

Heinrich Arnold

**Robert Döpel und sein Modell der globalen
Erwärmung**

Robert Döpel und sein Modell der globalen Erwärmung

Eine frühe Warnung – und die
Aktualisierung

Heinrich Arnold

2., überarbeitete und ergänzte Auflage

ilmedia

2010

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Die Originalausgabe ist 2009 im Druck und Online erschienen beim Universitätsverlag Ilmenau mit der ISBN 978-3-939473-50-3 bzw. der URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2009100044](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2009100044)

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

ilmedia

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/ilmedia

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2010200125](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2010200125)

„Mehr als die Vergangenheit interessiert mich die Zukunft, denn in ihr gedenke ich zu leben.“

ALBERT EINSTEIN

Dieses Motto der WEIMARER REDEN 2008, die im Deutschen Nationaltheater unter dem Generalthema „Zukunft anddenken“ gehaltenen wurden, griff die Journalistin

GABRIELE KRONE-SCHMALZ, Mitglied des Hochschulrates der TU Ilmenau, in der Einleitung ihrer Rede so auf:

„Auch wenn ich mich nicht erdreiste Albert Einstein zu widersprechen ..., ein kleines 'Aber' hätte ich schon. Und zwar in dem Sinne, dass man Vergangenes kennen muss, um Gegenwärtiges zu begreifen, damit das Fundament für die Gestaltung der Zukunft möglichst stabil ist.“

Vorwort zur 2. Auflage

Nachdem die 1. Auflage 2009 im Druck (mit online-Fassung) erschienen ist, wird nun die 2. Auflage als reine online-Fassung vorgelegt. Neben Korrekturen enthält sie eine Reihe von Nachträgen unter Berücksichtigung zusätzlicher Publikationen. Neue Zwischenüberschriften sollen die Lesbarkeit verbessern. Das hauptsächliche Anliegen ist geblieben und erhofft sich Unterstützung im deutschen Wissenschaftsjahr 2010, das der **”Zukunft der Energie”** gewidmet ist.

Die Zukunft wird sich dabei für ein Verantwortungsbewusstsein, wie es ROBERT DÖPEL verkörperte, auf wenigstens einige Jahrhunderte erstrecken - und nicht nur auf Jahre oder bestenfalls Jahrzehnte wie in der Politik. Seine exemplarische Rechnung zur zeitlichen Reichweite der Photovoltaik wurde gegenüber der 1. Auflage auf eine summarische Abschätzung auch für alle übrigen nachhaltigen Energien ausgedehnt. Zudem wurden Aussagen zur perspektivischen Bevölkerungsentwicklung einbezogen, und im Hinblick auf den Pro-Kopf-Energieverbrauch wurden ”entwickeltere” und ”weniger entwickelte” Länder unterschieden. Längere Passagen wurden zu Terminologie-Problemen beim ”Strahlungsantrieb” und beim *”Geo-Engineering”* bzw. *”Climate Engineering”* eingefügt, um Unklarheiten der 1. Auflage zu beseitigen. Weitere Ergänzungen betreffen die *”2-Grad-Grenze”* für die globale Erwärmung und die Vorräte an nicht-nachhaltigen Energien. Schließlich wurde - anhand zuvor unerwünschter bzw. unbeachteter Briefe von und über ROBERT DÖPEL - Ergänzendes zu seiner Persönlichkeit gebracht.

Für alle Aktivitäten, die eine Vertiefung der Problembehandlung und ein Aufgreifen durch die dafür eingerichteten Institutionen unterstützen, wäre ich dankbar, und besonders auch für eine Förderung der allgemeineren informatorischen Anliegen, die vor allem fortgeschrittenen Schülern und Studenten gelten.

Ilmenau, im Frühjahr 2010.

Heinrich Arnold

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Übersicht	11
2	Fakten und Diskussionen zur globalen Erwärmung	15
3	ROBERT DÖPEL, sein Klimamodell und die Aktualisierung	24
3.1	Wichtige Lebensstationen und Arbeiten DÖPELS	24
3.2	Die DÖPELschen Modellrechnungen und ihre Aktualisierung	30
3.3	Das Forcing-Konzept und die Sonne	50
3.4	Einbeziehung des anthropogenen Treibhaus-Effekts	54
4	Schlussbetrachtungen	69
4.1	Kernenergie?	69
4.2	Der Klimawandel und die „andere Kultur“	73
5	Zusammenfassung	79
6	Dank	84

1 Einleitung und Übersicht

„An Inconvenient Truth - A Global Warning“ lautet der Titel eines Films von AL GORE [1], dem unermüdlichen Warner und daher Mitempfänger des Friedensnobelpreises 2007 (zur Hälfte). Die Verleihung dieser Auszeichnung hat mit einer zunehmenden Konvergenz der Auffassungen unter dem Eindruck bedrohlicher Fakten zum Klimawandel zu tun. Dazu hat der andere Preisträger, der UN-Klimarat IPCC (*International Panel on Climate Change*) mit seinen mehreren Hundert unmittelbaren und weit mehr indirekt beteiligten Mitarbeitern, 2007 den 4. seiner Berichte¹ vorgelegt. Damit hat er wieder entscheidend zu einem politisch belastbaren Konsens über die globale Erwärmung und ihre Minderung beigetragen. Die koordinierte wissenschaftliche Arbeit dieses Gremiums ist nach Art und Umfang bisher einmalig, was auch Probleme mit sich bringt. Allein der für unsere Modellbetrachtungen wichtigste Teilbericht der Arbeitsgruppe I von 2007 [2] umfasst nahezu 1000 Seiten.

Bei den jahrelang vorherrschenden (und noch nicht beendeten) Kontroversen zum anthropogenen Treibhauseffekt sind Warnungen vor der globalen Erwärmung, die bereits vor mehr als drei Jahrzehnten vor allem vom *Club of Rome* im Zusammenhang mit anderen globalen Problemen erfolgten, zu wenig beachtet worden. Dazu gehören auch diejenigen des Physikers ROBERT DÖPEL (1895-1982) aus dem Jahr 1973 [3], die er durch erste Modellrechnungen untermauert hat. Seine bestechend einfache Analyse berücksichtigt allerdings noch nicht die Zunahme des Treibhauseffektes, sondern lediglich die „industrielle Energieerzeugung“ im weiten Sinne, d. h. die anthropogene Abwärme.

¹Den Hauptteil dieser *Assessment Reports* [2] bilden jeweils die Teilberichte dreier Arbeitsgruppen (Working Groups WG I-III) über „wissenschaftliche Grundlagen“, „mögliche Auswirkungen“ sowie „Verminderung des Klimawandels“. Vorangestellt werden *Synthesis Reports* (SYR), *Technical Summaries* (TS) und *Summaries for Policymakers* (SPMs). Eine Übersicht zu [2-2007] einschl. eines Abschnitts „Kritik“ bietet <http://de.wikipedia.org/wiki/IPCC>. - Eine Aktualisierung gegenüber dem 2007 wiedergegebenen Stand von 2005/06 wurde im November 2009 von einer Expertengruppe geliefert [13b].

Deren Auswirkungen sind bei Fortsetzung des seither eingetretenen Wachstums (ca. 2% pro Jahr) erst ab dem Ende des nächsten Jahrhunderts zu erwarten. Die verstärkte Sensibilität für Klimafragen lässt aber jetzt auf Offenheit auch für solche Überlegungen mit einem Zeit- und Verantwortungshorizont von Jahrhunderten hoffen. Bisher stehen vor allem die nächsten Jahrzehnte (oft ohne Berücksichtigung von Spätfolgen) zur Debatte – oder im anderen Extrem $10^4 - 10^6$ Jahre bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle.

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse von ROBERT DÖPEL und der Aktualisierungen werden zunächst im Abschnitt 2, der auch unabhängig von den späteren Rechnungen gelesen werden kann, einige wichtige Etappen auf dem Wege zum aktuellen Diskussionsstand über den Klimawandel betrachtet. Dieser wird vor allem mit Blick auf die Aktualisierung des DÖPEL-Modells dargestellt. Länger zurückliegendes, das die Jüngeren nicht miterlebt und die Älteren oft schon vergessen haben², wird besonders kritisch und ausführlich behandelt, zumal es noch wenig durch die elektronischen Medien erschlossen wurde.

Letzteres gilt auch für das Wirken DÖPELS, das in dieser Abhandlung - besonders im Abschnitt 3.1 - beginnend bei seiner ersten Professur und mit Blick auf seine Bedeutung für die TU Ilmenau als seiner letzten Lebensstation gewürdigt wird. Seine wichtigste frühere Leistung auf experimentalphysikalischem Gebiet, die am Anfang der Kerntechnik stand, erbrachte er zusammen mit seiner Frau und mit WERNER HEISENBERG als Theoretiker [3a] in Leipzig. Dort erschien zur 100. Wiederkehr des Geburtstags von ROBERT DÖPEL eine Sonderschrift [4], in der auch seine Zeit in Ilmenau ausführlich

²Ein Beispiel ist die Ozonschicht-Zerstörung durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe, deren atmosphärische Konzentration Mitte der 1990er Jahre kulminierte und dann reduziert wurde. Dazu sagte P. CRUTZEN, der 1995 in diesem Zusammenhang mit dem Chemie-Nobelpreis ausgezeichnet worden war, 2007 in einem Interview: „*Wie knapp es damals war, ist der Mehrheit der Menschen kaum präsent.*“ Auf die anschließende Frage: „*Kann sich die Menschheit noch einmal auf so viel Glück verlassen?*“ lautete die Antwort: „*Beim Klimawandel bestimmt nicht.*“ („Die taz“ 13.09.2007. Das Interview kann bei <http://www.wikipedia.de> unter „Ozonloch“ abgerufen werden.) – Mehr zum Ozonloch folgt in Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt im Abschnitt 2.

dargestellt ist. Hier entstand sein geophysikalisches Modell [3], das im Abschnitt 3.2 zusammen mit aktualisierten Rechnungen beschrieben wird.

Deren Aussagen werden nach Verallgemeinerung (in 3.3) gemeinsam mit aktuellen Literatur-Ergebnissen der Computersimulationen zum anthropogenen Treibhauseffekt diskutiert (in 3.4). Dieser ist gegenwärtig weit gravierender, kann aber wegen seiner Komplexität hier nur stark vereinfacht behandelt werden. Dabei werden Einsichten in die Klimaproblematik mit den dabei gängigen Begriffen und Größen vermittelt, die zum geophysikalischen und klimatologischen Grundwissen gehören. Im Nachhinein erweist sich DÖPELS Konzept als ein Sonderfall der Zurückführung globaler Temperaturänderungen auf das (Klima-) Forcing³, eine Art Triebkraft für die anthropogene Erwärmung.

Die mathematisch-naturwissenschaftlichen Anforderungen der quantitativen Behandlung überschreiten diejenigen an (werdende) Abiturienten nicht⁴. Die Modellbetrachtungen in den Abschnitten 3.2 - 3.4, zu denen auch eine englische Kurzdarstellung in der *Digitalen Bibliothek Thüringen* erschienen ist⁵, sind besonders für die „MINT-Fächler“ aus Mathematik, Informatik, Natur- und Technikwissenschaften gedacht⁶.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die globale Erwärmung, die durch den anthropogenen Treibhauseffekt auftritt, bei weiterer Steigerung der Energieerzeugung durch den zusätzlichen Einfluss der Abwärme überlagert wird. Das

³Entsprechend dem *climate forcing* des *Climate Research Committee* im US-amerikanischen *National Research Council* [5a]. Auf eine Übersetzung wird hier aus Gründen, die im Abschnitt 3.2 ersichtlich werden, verzichtet. Bei Verwechslungsgefahr, beispielsweise mit der „Forcing-Methode“ aus der mathematischen Mengenlehre, kann „Klima-Forcing“ verwendet werden.

⁴Die Darstellung beruht auf Erfahrungen, die der Autor an der Technischen Hochschule bzw. (seit 1992) Universität Ilmenau von 1978 bis 1999 hauptsächlich mit Ingenieurstudenten - auch Studienanfängern - und zuletzt im einwöchigen „*Ilmenauer Physiksommer 2008: Energie und Klima*“ für ausgewählte Oberstufenschüler gemacht hat. Alljährlich wird das Thema den TU-Studierenden der „*Technischen Physik*“ im Proseminar geboten.

⁵*Global Warming by Anthropogenic Heat Release*; <http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12474> (2009).

⁶Die Abkürzung MINT, die auch im Hochschulwesen gebräuchlich ist, entstammt dem deutschsprachigen gymnasialen Bereich mit <http://www.mint-ec.de> sowie <http://www.educ.ethz.ch/mint>.

Verständnis der hierzu grundlegenden Abbildung 2 (Abschnitt 3.2) erfordert keine eingehende Kenntnis der Rechnungen, auf denen sie basiert.

Der abschließende, wieder rein verbale Abschnitt 4 bringt zunächst Aussagen zur Kerntechnik. Danach wird (in 4.2), ebenfalls an die Arbeit [3] anknüpfend, auf gesellschaftliche und kulturelle Aspekte der Klimadebatte eingegangen, soweit sie nicht bereits in den Abschnitt 2 einbezogen werden. Dieser kann - ebenso wie der mehr biographische Abschnitt 3.1 - vom eiligen Leser übersprungen werden, wenn sich das Hauptinteresse auf quantitative Betrachtungen richtet. Umgekehrt können die Abschnitte 3.2 - 3.4 bei Desinteresse an solchen Betrachtungen ausgelassen werden. - Die Abfolge der Abschnitte wurde so gewählt, dass nicht nur die Modellrechnungen DÖPELS aus heutiger Sicht, sondern auch seine Persönlichkeit sowie Umstände und Vorgeschichte seines Wirkens in Ilmenau deutlich werden.

Eine wissenschaftsjournalistische, mit guten Begriffserläuterungen versehene Darstellung zum erweiterten historischen Hintergrund des folgenden Abschnitts 2 zur Klima-Debatte bietet das Taschenbuch [5].

2 Fakten und Diskussionen zur globalen Erwärmung

JEAN-BAPTISTE FOURIER hat den globalen Treibhauseffekt bereits 1822 bei seinen grundlegenden Arbeiten zur Wärmelehre als „l'effet de serre“ beschrieben⁷ oder, wie es Gassmann [7] formuliert, „vermutet“. Nach weiteren Vorläufern⁸ lieferte der Schwede ARRHENIUS ab 1896 die bahnbrechenden Erkenntnisse. Die atmosphärische „Weltmitteltemperatur“ an der Erdoberfläche⁹ wäre ohne den atmosphärischen Wärmestau der von der Sonne beschienenen Erde weit niedriger (s. Abschnitt 3.2). Er beruht auf der Absorption der abgestrahlten Wärme durch Wolken, Wasserdampf, Kohlendioxid und weitere Spurengase. Diese atmosphärischen Absorber übernehmen die Rolle eines Glasdachs, wobei die Ähnlichkeit mit den Verhältnissen im Gewächshaus natürlich recht begrenzt ist [9].

SVANTE ARRHENIUS (Chemie-Nobelpreis 1903) erkannte auch das anthropogene Verstärkungspotential für den Treibhauseffekt und schrieb 1907 über die Kohlendioxid-Zunahme, die er allerdings erst nach einigen Jahrhunderten als merklich erwartete [8a], sie lasse auf Zeiten hoffen,

„da die Erde um das Vielfache erhöhte Ernten zu tragen vermag zum Nutzen des rasch anwachsenden Menschengeschlechtes.“

Somit hat ARRHENIUS die Debatte um die globale Erwärmung durch den Menschen eröffnet.

⁷Das Handbuch der Physik von 1957 [6], auf das sich DÖPEL [3] bezieht, spricht von „*Glashauswirkung*“ bzw. vom „*greenhouse effect*“. - Letzterer wird in US-amerikanischen Umweltdebatten einem „*White House effect*“ gegenübergestellt, der auf die globale Temperatur gegenläufig oder auch in die gleiche Richtung wirkt, je nach Besetzung dieses Hauses.

⁸Eine ausführlich kommentierte Chronologie zur Literatur über den Treibhauseffekt bietet Wisniak [8].

⁹Für diese mittlere Globaltemperatur verwendete er, wie auch heute üblich, 15⁰C [9]. Nach [10a] zusammen mit [2], Fig. SPM.1, werden 14,5⁰C wohl im Jahr 2010 überschritten werden (s. a. Abb. 1a).

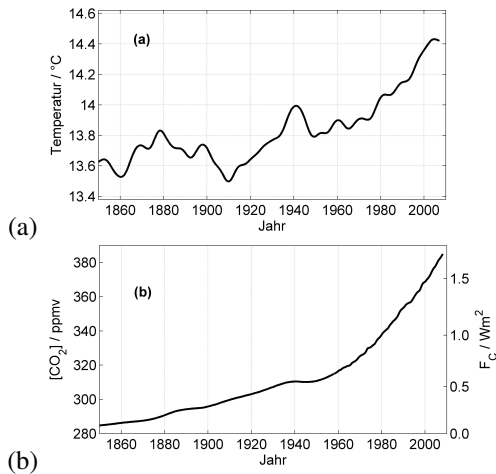


Abbildung 1:

(a) Zeitverlauf der mittleren globalen Oberflächentemperatur der Atmosphäre (s. Fußn. 9).

(b) Zeitverlauf der mittleren globalen CO_2 -Konzentration in $\text{ppmv} = \text{parts per million by volume}$, also Volumenteilen auf eine Million (nach Daten aus [10b]).

Zusätzlich auf der Ordinate rechts das CO_2 -Forcing F_c als logarithmisches Maß für das Verhältnis der aktuellen Konzentration zum „vorindustriellen“ Wert 280 ppmv von 1750 [2], berechnet nach Gl. (15) aus Abschnitt 3.4.

Die Zeit zwischen Svante Arrhenius und der Gründung des UN-Klimarates

Die breite Öffentlichkeit und auch große Teile der Fachwelt nahmen von der Erhöhung der Kohlendioxid-Konzentration (Abb. 1b) als möglicher Ursache einer globalen Erwärmung (Abb. 1a) bis zum Anfang der 1970er Jahre wenig Notiz. Dann aber wurde in den ersten beiden Berichten an den Club of Rome von 1972 [11] und 1974 [12] unter den wachstumsbegrenzenden globalen Problemen die anthropogene Klimaänderung die Zunahme des Kohlendioxids und auch der industriellen Energieerzeugung angeführt¹⁰. Über sie schrieb JOHN P. HOLDREN, der 2009 zum Klima-Berater des US-Präsidenten ernannt wurde, in einer zum 1. Bericht zitierten Studie [11a]: Die *„thermische Verschmutzung“* der Umwelt ist *„zwar nicht unser dringlichstes Umweltproblem. Sie könnte sich aber als das bedrohlichste erweisen, wenn wir so glücklich sein sollten, den anderen Einflüssen zu entgehen“*.

Vor den beiden Erwärmungsursachen wurde auch in einer kurz darauf erschienenen populärwissenschaftlichen Schrift [13] gewarnt. Angesichts der damaligen Zunahme der Energieerzeugung um jährlich 6% wurden deutliche Abwärme-Auswirkungen *„in ein- bis zweihundert Jahren“* prognostiziert.

In einem Bericht der 1974er Pugwash-Konferenz über *„Weltprobleme und Wissenschaft“* [13a] werden¹¹

„merkbare regionale oder lokale Klimastörungen ... infolge von Kombinationseffekten von Kohlendioxid- und Staubteilchenemissionen“ erwähnt, die beträchtlich früher eintreten könnten als *„eine tief greifende Störung des Weltklimas durch die an die Umwelt abgegebene Wärme“* infolge der menschlichen Energieerzeugung. Dies *„ist vermutlich erst beim 50- bis 100-fachen des gegenwärtigen Energieverbrauchs zu erwarten (das entspricht grob 80*

¹⁰Die Autoren des 1. Berichtes haben in ihren *„Neuen Grenzen des Wachstums“* von 1992 und im *„Update“* von 2006 [12a] die Erwärmung durch Energieerzeugung nicht mehr erwähnt, was mit den inzwischen stark verringerten Wachstumsraten (Abschn. 3.2) sowie mit dem auf das Jahr 21. Jahrhundert beschränkten Zeithorizont ihrer Computersimulationen erklärlich ist. Um so eingehender wurde nun die CO₂-Problematik bei den Wachstumsgrenzen unter Berufung auf die IPCC-Berichte [2] diskutiert.

¹¹Fettdruck im Original

bis 100 Jahren bei 5% jährlichem Wachstum).“

Über solche Aussagen hinaus können die dabei zu erwartenden Temperatursteigerungen, die bei diesem exponentiellem Wachstum zu erwartenden wären, mit dem DÖPEL-Modell von 1973 abgeschätzt werden (Abschnitt 3.2). Es zeigt, dass ein anhaltend exponentielles Wachstum der Abwärme unvertretbar ist, wie das die Autoren des *Club of Rome* auf breiterer Grundlage für andere umweltbelastende Einflüsse gezeigt haben. Diese als Warnungen vor exponentiellem Wachstum gemeinten Aussagen werden bis heute gern als Prognosen missverstanden und abgetan, wobei jedoch die entsprechenden, konstanten Wachstumsraten nach wie vor die Diskussion beherrschen¹².

Im zuletzt erwähnten, damals aktuellen Beispiel (5 % jährliches Wachstum von Energieverbrauch und Abwärme) resultieren auf der im Abschnitt 3.2 wiedergegebenen Grundlage einige Zehntelgrad für die zweite Hälfte unseres Jahrhunderts¹³. Um sich davon beeindrucken zu lassen, hätte es des Naturells eines Forstwirts bedurft, der mehrere Generationen vorausschaut, wie das die alte, ursprünglich forstwirtschaftliche Forderung der Nachhaltigkeit beinhaltet.

Ähnlich ist der Zeithorizont für eine Energieproduktion durch Kernfusion (s. Abschn. 4.1). Deren Förderer gehörten mit zur Zielgruppe der Warnungen ROBERT DÖPELS. Dabei hat er die Verstärkung des Treibhauseffektes völlig außer Acht gelassen, die inzwischen als hauptverantwortlich für die globale Erwärmung erkannt worden ist und bereits 0,7 Grad ausmacht ([13d], Key Message 3).

¹²Manchmal werden Übergänge zum linearen Wachstum als wünschenswert diskutiert [36d]. Es ist als Anfangsphase der exponentiellen Verläufe in unseren späteren Betrachtungen (zu Abb. 2c) enthalten und wird deshalb hier nicht gesondert besprochen.

¹³Dies ist aus DÖPELS Bild 1 für den jährlichen Steigerungskoeffizienten der anthropogenen Abwärme $q = 1.05$ abzulesen. Aus der aktualisierten Abb. 2c in unserem Abschnitt 3.2 ergibt sich Ähnliches, obgleich dort für die Jahre 1970-2000 das reale $q = 1.02$, also 2% statt 5% Steigerung pro Jahr zugrunde liegen. - Mit einer Beibehaltung dieser geringeren Steigerung wären nach diesem Modell erst am Anfang des übernächsten Jahrhunderts einige Zehntelgrad Temperaturerhöhung zu erwarten.

Allerdings war und ist der Temperaturverlauf keineswegs so monoton wie bei der Konzentration des Kohlendioxids, was Abb. 1 illustriert. Das CO_2 ist zwar für die derzeitige Zunahme der Temperatur ausschlaggebend, und auch die beiden Langzeittrends zumindest der vergangenen 10^5 Jahre verlaufen weitgehend parallel ([1]; [7], Abb. 9). Jedoch wurde zuletzt zwischen dem Anfang der 1940er und der Mitte der 1970er Jahre das „*global warming*“ durch ein „*cooling*“ [2-1990] unterbrochen. Das führte besonders gegen Ende dieses Zeitraums, als DÖPEL seine Arbeit [3] schrieb, zu kontroversen Debatten[11b], die er wohlweislich ignorierte. Als Hauptursachen sind Luftverschmutzungen durch Aerosole (s. Abschnitt 3.4) sowie vulkanische Einflüsse ([2], Fig. 9.5) anzusehen, ohne die heute eine deutlich stärkere Erwärmung vorläge.

Von der IPCC-Gründung bis heute

Die Vermutung einer globalen Gefahr für das Klima führte schließlich die Vereinten Nationen zusammen mit der *World Meteorological Organization* (WMO) 1988 zur Bildung des eingangs erwähnten IPCC. Bereits im 1. Bericht [2-1990] wurde die atmosphärische Zunahme der Treibhausgase als anthropogen und alarmierend charakterisiert.

Grundlegend für international abgestimmte Maßnahmen gegen den Klimawandel ist die 1992 verabschiedete und 1994 völkerrechtlich verbindlich in Kraft getretene UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) [13c]. Sie folgt dem damals neu entstandenen Prinzip der Staatengemeinschaft, dass auf eine massive Bedrohung der globalen Umwelt auch ohne endgültige Beweise für ihr genaues Ausmaß reagiert werden soll. Im Artikel 3 sind irreversible, d.h. „nicht wieder gutzumachende Veränderungen“ besonders hervorgehoben, zu denen der anthropogene Treibhauseffekt zählt. Dies steht den immer noch häufig gebrachten Plädoyers für ein Aufschieben von Gegenmaßnahmen auf die Möglichkeiten einer späteren, durch Wirtschaftswachstum reicher gewordenen Welt entgegen [44b]. - Alljährliche UN-Klimakonferenzen sollen die

Rahmenkonvention umsetzen, wobei das 1997 im japanischen Kyoto entstandene und 2012 auslaufende Zusatzprotokoll besonders herauszuheben ist.

Mehr Erfolg war dem internationalen Kampf gegen das 1984 entdeckte Ozonloch¹⁴ beschieden, auch bei der Verlangsamung des anthropogenen Treibhauseffekts (s. u.). Bereits 1987 wurde dazu das Protokoll von Montreal als das erste globale Umweltabkommen überhaupt beschlossen, das der Friedensnobelpreisträger und UN-Generalsekretär (1997-2006) KOFI ANNAN als das „bis heute vielleicht erfolgreichste internationale Abkommen“ pries. Zusammen mit den Folge-Abkommen stoppte es die Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht, deren Erholung sich bereits abzeichnet und in der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts vollständig sein könnte [16]. Im „Update“ der „Grenzen des Wachstums“ [12a] wird die „Ozon-Story“ unter der Überschrift „Zurück hinter die Grenze“ als klassisches Beispiel für eine Grenzüberschreitung mit der Gefahr des Kollabierens und deren Abwendung geschildert. Beim Treibhauseffekt zeichnet sich inzwischen ebenfalls eine Grenzüberschreitung ab (Abschnitt 3.4), deren Reduzierung die aktuelle Hauptaufgabe der Klimapolitik ist.

Da die Halogenkohlenwasserstoffe, die das Ozonloch verursachen, zugleich stark wirkende Treibhausgase sind¹⁵, wurde durch ihre Verminderung die globale Erwärmung erheblich verzögert¹⁶. Nach neuen Berechnungen aus dem niederländischen Umweltzentrum MNP (Milieu en Natuur Planbureau) [17] kompensierte dies ein Jahrzehnt der aktuellen Kohlendioxid-Zunahme. Das übertrifft bei weitem die erhoffte Konsequenz der Verpflichtung von Industriestaaten im Kyoto-Protokoll, ihre Emissionen von Treibhausgasen von

¹⁴Siehe hierzu Fußn. 2 und, auch zur Historie, [14] mit den Abschnitten 1.4.2, 2.1.3 und 2.2.

¹⁵Dies gilt auch für die Fluor-Kohlenwasserstoffe, die z. B. in der Kühltechnik nach dem Verbot der Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe eingeführt wurden und die in der EU seit 2006 der „F-Gase-Verordnung“ zur Leck-Prüfung und -Vermeidung an Kälteanlagen unterliegen. (Ein Verwendungsverbot soll erst 2011 erwoogen werden.) Ganz ohne Halogenkohlenwasserstoffe kommt die bereits 1993 kreierte *Greenfreeze*-Kühltechnik [15] aus, die sich weltweit immer stärker verbreitet und nunmehr auch in den USA als letztem Industrieland eingeführt wird.

¹⁶Umgekehrt existieren auch Auswirkungen dieses Effektes auf das Ozonloch, die jedoch noch unsicher sind [16].

2008 bis 2012 um durchschnittlich 5,2 % zu senken (bezogen auf das Niveau von 1990).

Dieser (zu) niedrige Wert wurde nicht zuletzt durch die Verhandlungsführung der USA verursacht, die beim Vizepräsidenten GORE lag¹⁷. Daraufhin (nach der Abgabe dieses Amtes) angesprochen, verwies er auf die realen Machtverhältnisse im Staate, in dem er „*nur der zweite Mann*“ gewesen sei [18]. Dies erinnert fatal an die Begründung des sowjetischen Verhandlungsführers in Montreal 1987, mit der er das Ozonabkommen in letzter Minute fast zum Scheitern gebracht hätte: Die Produktionsziffern der UdSSR für Halogenkohlenwasserstoffe seien bis 1990 im 5-Jahrplan festgeschrieben, und der dürfe laut Verfassung nicht geändert werden [19]. Dieses Problem konnte, letztlich dank GORBATSCHOW, mit Ausnahmeklauseln gelöst werden, während das CO₂- Problem wirtschaftlich und machtpolitisch ungleich größere Dimensionen hat und auch naturwissenschaftlich weit komplexer ist, was zu anhaltenden Auseinandersetzungen führte.

Zudem ließ die veränderte Weltlage in den 1990er Jahren verstärkte Forderungen zur Reduzierung der Ausgaben für den Umweltschutz aufkommen [20], während die Erkenntnis, dass verspätetes Reagieren zu höheren Kosten führt, noch zurückgedrängt wurde. Im Vorwort zum „*Update*“ der „*Grenzen des Wachstums*“ [12a] illustriert dies eine Gegenüberstellung des Weltumweltgipfels in Rio de Janeiro 1992 mit der „Rio+10-Konferenz“ 2002 in Johannesburg sowie der zwischenzeitliche Verlauf der Grenzüberschreitung (Abbildung V-1 im „*Update*“). Symptomatisch ist die Formulierung aus dem Vorwort einer Sammlung so genannter Öko-Irrtümer von 1997 [21]:

„Die erste Welle des Umweltschutzes hat viel erreicht. Aber sie ist unwiederbringlich vorbei.“

¹⁷Erfolgreicher war er beim Protokoll von Montreal, so dass er vom Präsidenten George Bush senior 1992 im Wahlkampf als „*Ozone Man*“ attackiert wurde. Sein Sohn wiederholte dies im Jahr 2000 [18]. Von GORE-Anhängern wurde diese Bezeichnung jedoch in einen Ehrentitel umgemünzt.

Um letzteres zu beweisen, listen die Autoren dieses mehrfach wieder aufgelegten Bestsellers mit großer Ausführlichkeit und Akribie – und nicht ohne Erfolg - Widersprüche u. a. bei der Klima-Debatte bzw. „*Klima-Hysterie*“ auf. Dabei werden nicht nur Journalisten-Kollegen und Politiker oder der „*Moral-Multi*“ Greenpeace attackiert. Auch und vor allem wird gegen Wissenschaftler und ihre Institutionen, wie das IPCC oder das „zum Deutschen Klima-Rechenzentrum hochgerüstete MPI für Meteorologie in Hamburg“¹⁸ polemisiert. Als das „*beste Umweltbuch der neunziger Jahre*“ wird in einer abschließenden Bücher-Liste die mehr als 700 Seiten umfassende, ähnlich abwegige Darstellung eines US-amerikanischen „*Öko-Optimisten*“ von 1995 [21a] empfohlen. Solche weit verbreiteten Schriften trugen zum „*business as usual*“ bei, wodurch bisher 2 Jahrzehnte für durchgreifende Maßnahmen gegen den Klimawandel praktisch verloren gingen.

Besonders in den Medien hat sich für Personen, die den menschlichen Einfluss auf das Klima bestreiten oder für irrelevant erklären, die Bezeichnung „Klima-Skeptiker“ eingebürgert (s. a. Abschn. 4.2, bes. zu Fußn. 99). Sie spielen den USA, dem Land mit den höchsten CO₂-Emissionen (Kopf an Kopf mit China), nicht zuletzt dank Unterstützung aus der Wirtschaft traditionell eine weit größere Rolle als in Europa. Beispielsweise beziehen sich bundesdeutsche Medien eher auf die dominierenden Auffassungen aus der Klimawissenschaft.

Dazu tragen die im besten Sinne des Wortes populärwissenschaftlichen Darstellungen prominenter Klimatologen bei, wie z. B. [25, 25a]. Hinzuweisen ist auch auf die „*10 besonders verbreiteten Irrtümer über die Klimaerwärmung*“ am Ende des Buches von AL GORE [1]. Dazu hat der Verlag der deutschen Ausgabe jeweils Internet-Hinweise auf individuelle Konsequenzen und Reaktionsmöglichkeiten speziell für Deutschsprachige eingefügt. Auch in den nichtelektronischen Medien sind genügend Beispiele für vorbildliches

¹⁸Dieses Max-Planck-Institut ist lediglich einer von mehreren Nutzern des Deutschen Klima-Rechenzentrums. Träger dieser Service-Einrichtung mit ihrer zur internationalen Spitze gehörenden Rechner-Leistungsfähigkeit [22] sind neben der MPG drei weitere Gesellschafter.

Handeln zu finden; so etwa in einem *Klima-Special* der Zeitschrift GEO [26].

Da die Medien gern apokalyptische Klima-Szenarien darstellen, was die Gefahr der Resignation mit sich bringt, sind solche Optionen für uns alle von besonderer Bedeutung. Zwar stammen nur 3-4% der globalen Treibhausgas-emissionen aus Deutschland; aber, so sagt eine Klima-Broschüre der Deutschen Physikalischen Gesellschaft [24] in diesem Zusammenhang: Es geht darum,

"Beiträge zu leisten, welche die anderen Akteure überzeugen, gemeinsam die richtigen Schritte zu unternehmen".

3 ROBERT DÖPEL, sein Klimamodell und die Aktualisierung

3.1 Wichtige Lebensstationen und Arbeiten DÖPELS

ROBERT DÖPEL (geb. 1895) schrieb mit 78 Jahren, getragen von hohem Verantwortungsgefühl, in Ilmenau seine erste und einzige Arbeit zum Klima [3] als ein „Quereinsteiger“ von der Energieseite her. Größte Bedeutung hat sein experimenteller Nachweis der Neutronenvermehrung in einem System aus Uranmetall und Schwerem Wasser im April 1942 erlangt. Er hat ihn zusammen mit seiner Frau und mit WERNER HEISENBERG als Theoretiker [3a] in Leipzig erbracht, was eine Voraussetzung für die in Deutschland angestrebte Nutzung der Kernspaltung zur Energiegewinnung darstellte.

Ende Juli desselben Jahres gelang auch der Gruppe um ENRICO FERMI in Chicago die Neutronenvermehrung mit einer Uranoxid-Graphit-Anordnung. Während FERMI eine im 20. Jahrhundert „*einmalige Doppelbegabung für theoretische und experimentelle Arbeiten*“ besaß [28], führte in Leipzig die Zusammenarbeit zwischen dem Theoretischen und dem Experimental-Physiker, als der DÖPEL 1938 seine erste Professur angetreten hatte, zum Erfolg. In einem Brief [4-F] erinnerte er sich noch 1982, wenige Monate vor seinem Tode:

„Das war die angenehmste Arbeitszeit, die ich in Leipzig überhaupt erlebt habe. ... Da saß man nun mit dem größten theoretischen¹⁹ Physiker jener Zeit im Labor oder sonst irgendwo zusammen, und alle Gespräche waren so erfreulich unbeschwert, daß alles so ideal war, wie man es nur wünschen konnte. ... Aber HEISENBERG über- oder unterschätzte gelegentlich die experimentellen Möglichkeiten.“

¹⁹Statt „*physikalischen Physiker*“ im handschriftlichen Original. Der Brief war an den Heisenberg-Experten HELMUT RECHENBERG gerichtet. Ihm dankt DÖPEL darin als dem Mitautor der Arbeit [28], die für die richtige Wahrnehmung der historischen Abläufe grundlegend ist.

DÖPELS Frau KLARA übernahm „*die Umrechnung der Messergebnisse für die Beantwortung der theoretischen Fragen*“²⁰. Sie hatte ihren Beruf als Juristin 1933 aus politischen Gründen aufgegeben und sich nach der Heirat in Würzburg, wo ihr Mann bis 1938 Privatdozent war, physikalischen Studien gewidmet. Bei den Leipziger Kernspaltungsexperimenten arbeitete sie unentgeltlich mit, und sie war der erste Mensch, der „*bei der Auswertung der experimentellen Ergebnisse erkannte, daß eine Uranmaschine möglich war*“²¹.

„*Heute weiß wohl hier in der DDR niemand mehr davon, dass damals solche Ergebnisse erzielt wurden*“,

schrrieb DÖPEL am 28.12.1966 an HEISENBERG. Die inzwischen eindeutig geklärten Prioritäten werden manchmal auch jetzt noch verkürzt und falsch dargestellt. Zur Klärung trug vor allem eine Aussage im Epilog eines Buches von 1967 [29c] bei²²:

„*Die Deutschen waren im ersten Halbjahr 1942 mit ihrem Leipziger Meiler L-IV die ersten Physiker in der Welt, die eine positive Neutronenproduktion zustande brachten.*“

Am 24. Juni 1942 gingen in Leipzig die Arbeiten am Reaktor, der durch eine chemische Verpuffung zerstört wurde, zu Ende.

Schon vorher wurde eine Schwerpunktsverlagerung der Arbeiten HEISENBERGS an das Kaiser-Wilhelm-Institut (KWI) für Physik in Berlin beschlossen. Das Ehepaar DÖPEL vermochte seiner Bitte, ihn zu begleiten, in Vor-

²⁰Brief DÖPELS vom 7.3.1976 an ELISABETH HEISENBERG.

²¹Nach einer Äußerung DÖPELS aus einer dem Wirken in Leipzig gewidmeten Arbeit [29]. Zusammen mit seiner Frau hat er dort auch mit einer Arbeit [29b], die bereits in Würzburg begonnene Untersuchungen fortsetzte und auf die er im Rückblick ebenfalls besonderen Wert legte, einen frühen Beitrag zur Neutronenaktivierungsanalyse geleistet.

²²Demgegenüber sind in manchen Details und auch in den aufeinander folgenden Titel-Formulierungen dieses Buches [29c] Dichtung und Wahrheit vermischt. Der weniger verkaufsfördernde erste Titel „*The Virus House*“ bezog sich auf ein Berliner Laborgebäude, dessen Name abschreckend ansteckend klingen sollte. (Bestrebungen der Naziführung zum Bau der Atombombe wurden bekanntlich schon bald nach Kriegsbeginn als illusionär zurückgestellt, während die Fortführung des Energiegewinnungsprojektes am 4. Juni 1942 mit dem Reichsminister SPEER beschlossen wurde [28].) Das Buchexemplar DÖPELS enthält zahlreiche und zu Stellen, die ihn selbst betreffen, besonders bemerkenswerte Randnotizen.

aussicht personalpolitischer Probleme nicht zu folgen²³ und schied damit aus dem Uranprojekt aus. Im Berliner Institut und seinen wegen der Bombenangriffe eingerichteten Außenstellen gelang es während der drei noch verbliebenen Kriegsjahre trotz erhöhter Aufwendungen nicht, einen Reaktor kritisch werden zu lassen, d. h. die für den Dauerbetrieb erforderliche Neutronenvermehrung zu erreichen. Dagegen realisierte die Gruppe FERMI bereits im Dezember 1942 eine solche Vermehrung, womit der deutsche Vorsprung endgültig verloren war.

Eine Aussage in der bisher umfangreichsten und weitest verbreiteten HEISENBERG-Biografie [29a] von DAVID C. CASSIDY über „...Döpel, der dem Zentrum der Macht näherstand als die Berliner Gruppe, ...“, muss in ihr Gegenteil verkehrt werden: Schon wegen der politischen Linksorientierung seiner Frau KLARA hatte DÖPEL allen Grund, dieses Zentrum zu meiden. In einem Bestseller zur Kernenergie von 1956 [29d] wurde er, der nach politischen Auseinandersetzungen durch die Gestapo vorgeladen und verwarnt wurde [4-E], dennoch explizit als *Nationalsozialist* bezeichnet. In späteren Auflagen durfte das nicht mehr geschehen, was aber wenig an der Weiterverbreitung dieser Injurie (besonders im angelsächsischen Raum) ändert.

Im April 1945, wenige Tage vor dem Einmarsch der US-Truppen, kam KLARA DÖPEL in Leipzig bei einem Luftangriff ums Leben, während ihr Mann einen Kurzbesuch bei seinen Eltern in Thüringen machte.

²³Im oben zitierten Brief von 1982 heißt es: „*Leider ging Herr Heisenberg auch bei unvermeidbaren persönlichen Entscheidungen von der Vornehmheit seiner eingesetzten Mittel selbst dann nicht ab, wenn deren Erfolglosigkeit eigentlich schon von vornherein einzusehen war.*“ Im Umzugsplan hatte er das NSDAP-Mitglied Erich Bagge nicht mit für das KWI vorgesehen, dem es dann jedoch „*leichtfiel, seinen Übergang nach Berlin von seinen Nazigenossen im Heereswaffenamt anordnen zu lassen.*“ - Die Nennung dieses in [4-F] ausgelassenen Namens aus dem Originalbrief wurde hier gegenüber der 1. Auflage nachgeholt. Das soll dem Verständnis eines ebenfalls mit Namensnennung abgedruckten, ungerechtfertigt kritischen Briefes von BAGGE über DÖPEL vom 5.5.1995 an C. KLEINT [3b] dienen. Darin kommt auch zu diesem späteren Zeitpunkt völliges Unverständnis des Verfassers für die Situation und für das Agieren HEISENBERGS zum Ausdruck.

In der UdSSR

Im August 1945 ging ROBERT DÖPEL zusammen mit anderen deutschen Wissenschaftlern nach Russland²⁴, wo er sich in einem Forschungsinstitut nahe Moskau an der Gewinnung Schweren Wassers zu beteiligen hatte. Jedoch „soll er, bedingt durch den Tod seiner Frau, seelisch so destabilisiert gewesen sein, daß er kaum zum Arbeiten kam“ [4-E], und wahrscheinlich ist er schon 1948 aus dem sowjetischen Atomprogramm ausgeschieden. Über seine Mitarbeit durfte er sich natürlich nicht näher äußern; wohl aber darüber, dass er sich mit Blick auf das labile „Gleichgewicht des Schreckens“ der Machtblöcke seiner ganzen Natur nach auf der schwächeren - als der richtigen - Seite sah.

„Döpel, der egoistisches Besitz- und Konsumdenken ablehnte, muss sich unter russischen Menschen wohlgefühlt haben“, heißt es weiter bei M. HÖTZEL [4-E]²⁵. WADEWITZ [4-B] berichtet zu einem Brief vom 28.4.1981 über ein Gespräch mit DÖPEL, nach dem „sein Entschluss, 1945 in die Sowjetunion

²⁴In Voraussicht der Ost-West-Alternative für die Arbeit nach einem verlorenen Krieg hatte sich DÖPEL in Gesprächen mit seinem Kollegen HANLE [32] schon bald nach Kriegsbeginn für den Osten entschieden. Beide blieben sich dennoch lebenslang freundschaftlich verbunden. Vor diesem Hintergrund verließ die TH Ilmenau 1990 an WILHELM HANLE, der besonders durch den nach ihm benannten Effekt bekannt ist, einen Ehrendoktor-Titel.

²⁵„Ob die Produktivität sozialistischer Systeme je die des Kapitalismus erreichen wird, weiß ich nicht; ich glaube aber, daß kein System, in dem sich der Egoismus einzelner, privater Gruppen frei auswirken kann, den im nächsten Jahrhundert auf uns zukommenden Problemen gewachsen sein wird. Natürlich müssen alle Organisationen, die an einer neuen Gesellschaft bauen wollen, noch sehr viel lernen, auch daß Sozialismus und Kommunismus nicht ein und dasselbe sind.“ Dies schrieb ROBERT DÖPEL sehr viel später, am 17.1.1980, nach Mainz an Fritz Straßmann, den Mit-Entdecker der Kernspaltung. Der Brief wurde zusammen mit bisher ebenfalls unveröffentlichten Materialien 2008 von Frau Chr. Fraas, einer früheren hilfreichen Nachbarin des Ehepaars DÖPEL, dem Archiv der TU Ilmenau [31] übergeben.

Der sehr ausführliche und professionelle, wenngleich ohne persönliche Bekanntschaft entstandene DÖPEL-Artikel [4-E] aus dem *Historischen Seminar der Universität Leipzig* enthält einen besonderen Abschnitt „Döpel und der Sozialismus“. Er konstatiert zwischen den DDR- und anderen Darstellungen eine „objektive Widersprüchlichkeit“, deren Lösung möglicherweise „im bisher noch unerschlossenen privaten Briefwechsel verborgen“ sei. Ein Beispiel dafür stellt der zitierte Brief an F. STRASSMANN dar. Auch aus Ilmenauer Gesprächen im kleinen Kreis müssen die von HÖTZEL vermuteten „Differenzen zu Form und Praktiken des Sozialismus“ bei ROBERT DÖPEL bekräftigt werden (s. a. Fußn. 51). Das Zerwürfnis mit Funktionären der Ilmenauer Hochschule hat - entgegen manchmal noch heute gehörten, anderen Behauptungen - hier seine hauptsächlichsten Gründe.

zu gehen, auch dadurch bestärkt wurde, dass russische Hilfskräfte ihn nach dem Angriff auf das Leipziger Institut unterstützt hätten, seine dabei umgekommene Frau auszugraben.“ - WERNER HEISENBERG ließ ihm bei erster Gelegenheit einen teilnahmevollen Brief nach Russland zukommen²⁶, in dem es nach Erinnerungen an die häuslichen Treffen der beiden Ehepaare heißt:

„Ihr Entschluss, nach Russland zu gehen, erscheint mir nach allem, was wir früher besprochen haben, menschlich verständlich und konsequent, und sie werden wahrscheinlich genauso über die Tatsache denken, dass wir jetzt hier in Göttingen sitzen.“ [Weiterer Text von der sowjetischen Zensur unleserlich gemacht.]

Von 1952 bis '57 war DÖPEL Professor für Experimentalphysik an der Universität in Woronesh, wo er seine zweite Frau SINAIDA, Ukrainerin und Witwe eines im 2. Weltkrieg gefallenen Offiziers, heiratete. Möglicherweise, so sagte er später, wären sie dort geblieben, wenn sich der versprochene Bau kernphysikalischer Laboratorien nicht verzögert hätte. Solche Laboratorien wurden ihm dann von der Hochschule für Elektrotechnik in Ilmenau versprochen. Obwohl dies nicht eingehalten wurde, lehnte er 1959 einen erneuten Ruf nach Woronesh unter Hinweis auf sein Alter von 64 Jahren ab.

Die Ilmenauer Jahre

Die ROBERT DÖPEL gegebene Zusage einer kerntechnischen Ausbildung und Forschung in Ilmenau wird - unter Berufung auf dortige Quellen - meist als leichtfertig und er selbst als leichtgläubig bezeichnet, weil er sich zu fest darauf verließ [4-E]. Nach Aktenlage [31] gab es jedoch noch im Oktober 1957 die Unterschrift eines Ministers unter den Antrag zu seiner Ernennung für das Fach „Experimentelle Kernphysik“. Erst im Dezember, als er seine Tätigkeit bereits aufgenommen hatte, kam vom Staatssekretariat für Hochschul-

²⁶ Geschrieben am 22.10.1946 und abgedruckt als Beilage zu dem in Fußn. 19 erwähnten Brief an H. RECHENBERG vom 2.8.1982 [4-F]. - Ein persönliches Treffen gab es erst wieder 1967, als HEISENBERG seinen berühmt gewordenen Goethe-Vortrag [30] im Weimarer Nationaltheater hielt und anschließend in das nahe Ilmenau kam.

wesen das „Aus“ für das umfangreiche, bereits vor den Kontakten mit DÖPEL ausgearbeitete, staatliche Vorhaben zur Ilmenauer Kerntechnik-Ausbildung. Die Ursachen für die daraus resultierenden Missshelligkeiten lagen also in Ostberliner Regierungs-Problemen.

Aber auch ein Senatsbeschluss, DÖPELS Dienstzeit entsprechend der früheren Mindest-Zusage bis 1963 zu verlängern, wurde nicht eingehalten, was zu erneuten, heftigen Auseinandersetzungen führte²⁷. Schließlich bekam er weitere, wenn auch stark verminderte Arbeitsmöglichkeiten im Institut zugestanden, da die Betreuung seiner 5 Doktoranden anders nicht möglich war. Er selbst war noch bis 1975 experimentell tätig, obwohl sein Sehvermögen stark abgenommen hatte. Wegen der Bezahlung einer Laborantin aus eigener Tasche wurden ihm von der Hochschulleitung „kapitalistische Allüren“ vorgeworfen, was er dem Hochschulminister noch 1981 im Dankschreiben für die Gratulation zum 85. Geburtstag vorhielt [4-E]²⁸.

Sein Ilmenauer Forschungsgebiet war wieder die Gasentladungsphysik, die schon früher ein „zweites Standbein“ für ihn darstellte und die jetzt eine Renaissance erlebte [4-D]. Von hier aus suchte er, so wie früher von der Kernphysik her, die Verbindung zur Astrophysik, in der er sich ebenfalls einen

²⁷ Beispielsweise legt der Brief DÖPELS an einen Dresdner Kollegen vom 26.9.1962 [4-F] davon Zeugnis ab. Vom Senat der damaligen *Hochschule für Elektrotechnik* wurde eine handverlesene Kommission (ohne Naturwissenschaftler und Mathematiker) zur Prüfung eingesetzt. Obwohl deren Bericht u. a. die „nicht richtige“ Behandlung der Emeritierung „trotz des Hinweises des Staatssekretariats“ konstatierte, erklärte der Senat am 11.9.1962 die Angelegenheit als abgeschlossen.

²⁸ In diesem Zusammenhang ist einer Schuldzuweisung an DÖPEL für seine „eigene Isolaton“, die in [4-E] (mit freundlichem Bedauern) abgedruckt wurde, zu widersprechen. Sie erfolgte aus Sicht derjenigen Partei, deren Sekretär seinen Ausschluss aus der Fakultät beantragt hatte und damit seinen Austritt (und den Rücktritt als Prodekan) verursachte. Die Anfrage im erwähnten Brief von 1962 [4-F], ob ein solcher Antrag rechtens sei, war unter den bestehenden Machtverhältnissen eher rhetorischer Natur, zumal auch DÖPELS Opposition gegen politisch motivierte Exmatrikulationen eine Rolle spielte. - Richtig ist, dass sein streitbares und zu jeder Zeit unangepasstes Naturell nicht selten zur Konfrontation mit den jeweils Mächtigen und deren Handlangern geführt hat. Das bezeichnet er am Ende des Briefes als „zur Belebung einer aktiven Gegenwehr notwendig“. - WILHELM HANLE (s. Fußn. 24) hat seinen Freund treffend als einen „Gerechtigkeitsfanatiker“ bezeichnet. Dieser Charakterzug und seine „Offenheit ohne Ansehen der Person“ [4-D] haben ihm zum eigenen Leidwesen [54] nicht wenige Schwierigkeiten eingebracht. (Vgl. Fußn. 27 u. 51.)

Namen machte [32, 4-D]. Faszinierend waren seine Schaffenskraft und die Liebe, die er zur wissenschaftlichen Arbeit bis ins hohe Alter empfand²⁹. Darüber hinaus hatte er weit gespannte geistig-kulturelle Interessen (an die im letzten Abschnitt 4.2 angeknüpft wird). - Er verstarb 1982 am Tag vor seinem 88. Geburtstag in Ilmenau [32].

3.2 Die DÖPELschen Modellrechnungen und ihre Aktualisierung

Zunächst sei das geophysikalische Bilanzmodell aus dem bereits erwähnten Handbuchartikel [6], auf den DÖPEL aufbaut, mit aktualisierten Parametern so dargestellt, wie es auch im nächsten Abschnitt benötigt wird.

Im zeitlich und global gemittelten Strahlungsgleichgewicht Erde/Kosmos ist die auftreffende Solarstrahlung energetisch gleich der von der Erde mit ihrer Atmosphäre reflektierten und gestreuten plus der (vorzugsweise von höheren Atmosphärenschichten) ins Weltall emittierten, längerwelligen Temperaturstrahlung [9]. Diese kann mit der Näherungsannahme eines schwarzen Körpers bzw. einer Schicht der effektiven Strahlungstemperatur T_e nach dem STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz berechnet werden. Damit ergibt sich die linke Seite der Energiebilanzgleichung:

$$\sigma T_e^4 = (1 - A) I_0 / 4 \quad (1)$$

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$: STEFAN-BOLTZMANN-Konstante.

$T_e = 255 \text{ K}$: Effektive Gleichgewichts-Temperatur einer fiktiven, als schwarzer Strahler wirkenden Atmosphärenschicht.

²⁹Im erwähnten Brief (Fußn. 27) heißt es beispielsweise zur Spektralanalyse: „*Ein Spektrum ist für mich nicht nur ein physikalisches Dokument, sondern darüber hinaus beinahe so etwas wie eine Art Musik.*”

$A = 0.30$: Planetarer Reflexionskoeffizient, entsprechend einer planetaren Albedo von 30%.

$I_0 = 1\,367\text{ W m}^{-2}$: Solar-”Konstante”. Auf diesen Referenzwert, der mit neueren Messungen der früher für konstant gehaltenen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre gut übereinstimmt [9], hat man sich in der WMO (*World Meteorological Organization*) 1982 geeinigt.

Die 4 im Nenner der rechten Gleichungsseite ergibt sich aus der Umrechnung des Erdquerschnitts, auf den sich die Solarkonstante als Strahlungsintensität der Sonne im mittleren Erdbstand bezieht, in die für das Strahlungsgleichgewicht maßgebende Oberfläche der Erdkugel. Der additive Beitrag der anthropogenen Abwärme kann an dieser Stelle vernachlässigt werden.

Für die effektive Strahlungsgleichgewichts-Temperatur T_e resultieren mit diesem Bilanzmodell 255 K, entsprechend -18°C . Von DÖPEL wurden 250 K aus dem Handbuch der Physik [6] verwendet, die sich mit der höheren Albedo $A = 0.35$ ergaben. Diese Temperatur für den Schwarzen Strahler wurde empirisch einer Höhe von etwa 6 km zugeordnet, die man „*etwa als mittlere Obergrenze der Wolken annehmen kann.*”

Eine solche Zuordnung ist jedoch schon wegen der hauptsächlich in den Wolkenlücken wirksamen Treibhausgase problematisch, und sie ist auch nicht erforderlich. Stattdessen wird für neuere Darstellungen die Obergrenze der Troposphäre, die im Mittel bei 11 km liegt [9], im Zusammenhang mit dem Forcing-Konzept (Abschnitt 3.3) wesentlich. Bis zu dieser Grenze, der Tropopause, nimmt die Temperatur ab auf mittlere 218 K, um dann innerhalb der Stratosphäre für einige km konstant zu bleiben und darüber wieder zuzunehmen. Mit dieser Inversion ist eine weitgehende Begrenzung für das Wettergeschehen verbunden, von dessen komplizierten Details in der Strahlungsbilanz völlig abgesehen wird.

Zwischen der Luft an der Erdoberfläche mit der mittleren Temperatur von 15°C (s. Fußn. 9) und der fiktiven, als schwarzer Strahler fungierenden Schicht

ergibt sich eine mittlere Temperaturdifferenz von $[15 + 18] K = 33 K$ (gegenüber $[15 + 23] K = 38 K$ bei DÖPEL), die auf den Treibhauseffekt zurückzuführen ist.

Ebenso einfach wie das Strahlungsbilanzmodell ist nun der Ansatz, den DÖPEL zur Abschätzung des Einflusses der anthropogenen Abwärme F_w auf die effektive Temperatur T_e verwendet hat. Danach wächst F_w exponentiell mit einem Steigerungskoeffizienten q (entsprechend $100[q - 1]\%$) pro Jahr.

Mit dem Startwert $F_{w,o}$ gilt nach $\triangle t = t - t_0$ Jahren:

$$F_w = F_{w,o} \exp([q - 1] \cdot \triangle t / a) = F_{w,o} \cdot q^{\triangle t/a} \quad (2)$$

Für die zweite Teilgleichung wurde die Näherung $\ln q = q - 1$ verwendet. Mit der Strahlungsgleichung (1), deren rechte Seite die von der Erde aus der Sonnenstrahlung aufgenommene, mittlere Strahlungsflussdichte

$$l_s = 239 W m^{-2} \quad (3)$$

darstellt, ergibt sich nach der Zeit $\triangle t$ die effektive Temperatur

$$T_{e,t} = T_e \left(\frac{l_s + F_{w,o} \cdot q^{\triangle t/a}}{l_s} \right)^{1/4}. \quad (4)$$

DÖPEL verwendet für sein Startjahr 1970 $F_{w,o} = 0.016 W m^{-2}$, was im Nenner gegenüber l_s vernachlässigt wurde.

Aktualisierungen

Für die aktualisierten Rechnungen mit dem Startjahr 2000 wird stattdessen $F_{w,o} = 0.023 W m^{-2}$ verwendet. Dieser Wert ergibt sich aus einer detaillierten tabellarischen Darstellung des Wissenschaftlichen Beirats „Globale Umweltveränderungen“ der BRD. Dabei wurden hier von der gesamten Abwärme

13 % für die regenerativen Energien abgezogen, die der Sonneneinstrahlung entstammen und nicht zur Netto-Erwärmung beitragen³⁰.

Weiterhin sei die binomische Näherung verwendet:

$$\Delta T_e = T_{e,t} - T_e = T_e \frac{F_{w,o}}{4I_s} q^{\Delta t/a} \quad (5)$$

oder

$$\Delta T_e = \frac{T_e}{4I_s} F_w = 0.27 F_w \frac{K m^2}{W}. \quad (6)$$

Damit ist direkte Proportionalität zwischen der Temperatur-Zunahme und dem aktuellen F_w mit dem Faktor

$$\lambda_e = 0.27 \frac{K m^2}{W} \quad (7)$$

gegeben. Die gleiche Näherung ergibt sich auch direkt aus der Bilanzgleichung (1) mit der Strahlungs-Flussdichte I_s aus Gl. (3), wenn man diese nach T_e differenziert und den Differentialquotienten dem Differenzenquotienten mit $\Delta I_s = F_w$ gleichsetzt.

Gl. (6) kann als Anwendung des Forcing-Konzepts, dessen Verallgemeinerung Gegenstand des Abschnitts 3.3 ist, betrachtet werden. Während jedoch z.B. die infrarot-aktiven Treibhausgase ein "*radiative forcing*" liefern, greift die Abwärme nicht unmittelbar in den globalen Strahlungshaushalt ein. Also trägt sie mit einem "*non-radiative forcing*" zu dem in Fußnote 3 kommentierten Forcing bei.

³⁰Tab. 4.4-1 im WBGU-Hauptgutachten 2003 „Welt im Wandel - Energiewende zur Nachhaltigkeit“. (Kostenlose Broschüre auch unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.html.) Der Gesamtwert ist $0.026 W/m^2$.

Terminologie- und Zuordnungsprobleme

Den Terminus "*non-radiative forcing*" des von DANIEL J. JACOB geleiteten US-amerikanischen Komitees, das den Bericht [5a] erarbeitet hat, ersetzt das IPCC [2](Abschn. 2.5.1) durch den "*similar term 'non-initial radiative effect' ...*". Ausdrücklich wird darin die Abwärme einbezogen und konstatiert, dass deren Wirkungsmechanismen noch nicht hinreichend identifiziert seien. Danach wird im Abschnitt 2.5.7 unter der Überschrift „*Anthropogenic Heat Release*“ die globale Energieerzeugung von 0.03 W/m^2 von 1998 angegeben (vgl. Fußnote 30). Im Unterschied zum urbanen Bereich wird ihr global kaum Bedeutung zugesprochen, ohne dass perspektivische Möglichkeiten erwähnt würden³¹.

In der deutschen Fassung [2-2007] steht für das "*Radiative Forcing (RA)*" auch im Glossar "Strahlungsantrieb (SA)", während "*non-initial radiative effects*" gänzlich unberücksichtigt bleiben. Vom "Deutschen und Hamburger Bildungsserver" werden demgegenüber solche Effekte (mit Verdunstungskälte und Diffusion als Beispielen) angeführt und den mit einem Strahlungsantrieb³² verbundenen Phänomenen gegenübergestellt.

Die Terminologie-Lücke in den deutschsprachigen Darstellungen zum 4. IPCC-Bericht spiegelt dessen Ausgliederung aller "*non-initial radiative effects*" aus dem Forcing wider, mit der auch die Abwärme ins Abseits geraten ist³³. Sie konnte noch im 3. Bericht [2-2001] mit seiner Beschränkung

³¹Ihr Wert ist aber deutlich größer als eine Reihe anthropogener Forcings, die z. B. in einer Tabelle 2.13 aus [2] (mit zugehöriger Fig. 2.21 im Abschnitt 2.9) aufgeführt sind und die z. T. wesentlich eingehender kommentiert werden. Hierzu gehört der Beitrag von 0.01 W/m^2 , den die Kondensstreifen von Flugzeugen derzeit liefern und der in einer summarischen Darstellung (Fig. SPM.2. in [2]) als kleinstes Forcing enthalten ist.

³²Dieser wird dort (unter <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Strahlungsantrieb>, Pkt. 3: "Vor- und Nachteile des Konzepts") auch als "Klima-Antrieb" bezeichnet, so dass sich dessen Verwendung für das "*climate forcing*" aus [5a], also für unser Forcing, leider verbietet. - Sein Vorteil gegenüber dem "Strahlungsantrieb" ist, sich besser von dem für Triebwerke verwendeten "Strahl-Antrieb" abzuheben. Das verwandte "Forcieren" dürfte die Bedenken sprachlicher Puristen verringern.

³³Sie erscheint weder in den Registern noch im Glossar [2-2007], und die dafür relevanten Abschnitte enthalten keine wechselseitigen Verweise. Deshalb mussten die Einordnungsprobleme hier zusammenhängend dargestellt werden.

des Zeithorizonts bis 2100 außer Betracht bleiben, die aber im 4. Bericht nicht mehr durchgängig aufrecht erhalten wurde.

Resultate bis zum Jahr 3000

Der Abschnitt 10.7 des 4. IPCC-Berichts [2] enthält Modell-Resultate bis zum Jahr 3000, die in Abb. 2 auszugsweise den Aussagen des aktualisierten DÖPEL-Modells gegenübergestellt sind.

Diese Abbildung, die auch für die nachfolgenden Abschnitte grundlegend ist, stellt die Abwärme-Wirkung aus dem unteren Teil (c) den IPCC-Modell-darstellungen zum CO_2 in den Teilen (a) und (b) gegenüber, die ohne Abwärme-Wirkung gelten. Sie werden im Abschnitt 3.4 mit allgemeinen Modellbetrachtungen für den anthropogenen Treibhauseffekt kommentiert, wobei auch dort der Aufwand solcher Rechnungen nur angedeutet werden kann. Er übertrifft denjenigen für die elementaren Abwärmekalkulationen bei Weitem.

In den ausgezogenen Verläufen der Abb. 2c ist die Zunahme der effektiven Temperatur ΔT_e nach Gl. (4) bzw. (6) dargestellt, wobei die mathematischen Näherungen praktisch ohne Einfluss auf das Bild sind. (Den punktierten Verläufen liegen die unter der nächsten Zwischen-Überschrift folgenden *”Rückkopplungs-Betrachtungen”* zu Grunde.)

Die Differenz zwischen der Temperatur T_e der fiktiven Atmosphärenschicht, die gewissermaßen als Treibhausdach wirkt, und der Bodentemperatur T_s wirkt als Triebkraft für den Transport der vorzugsweise am Boden absorbierten Sonnenstrahlenenergie zur fiktiven Schicht nach oben. Diese Temperaturdifferenz, die mit den Rückkopplungseffekten zusammenhängt, kann keinesfalls größer werden, wenn die anthropogene Abwärme zusätzlich in Bodennähe eingespeist wird. Deshalb stellt ΔT_e für die Zunahme der Temperatur an der Erdoberfläche T_s eine Untergrenze dar.

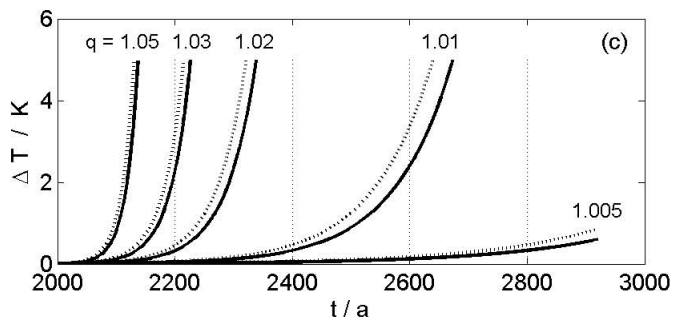
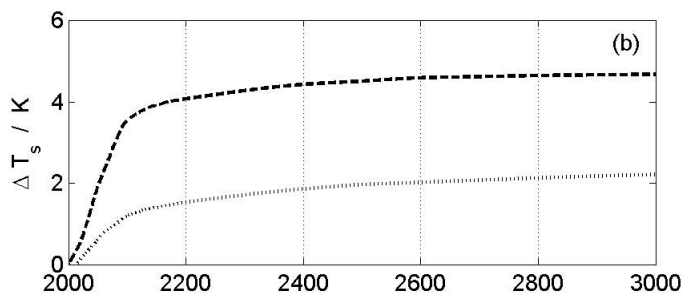
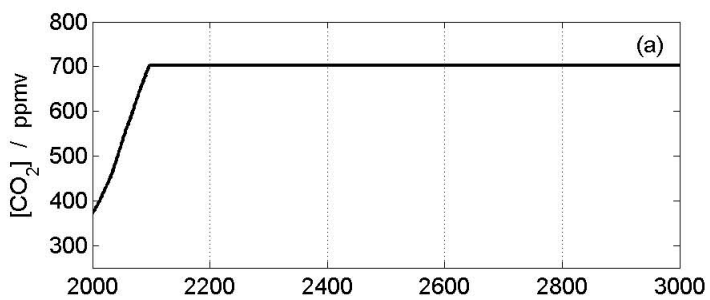


Abbildung 2:

(a) Atmosphärischer CO_2 - Konzentrationsverlauf (nach Daten aus Fig. 10.34a in [2]) entsprechend einem Emissions-Szenarium des Typs A1B (s. Fußn. 41) bis zum Jahr 2100 mit der Konzentration 700 ppmv. Diese wird danach als Fiktion beibehalten.

(b) Zu (a) gehörige Verläufe der globalen Oberflächentemperatur-Zunahme ΔT_s der Erde aus zwei IPCC-Modellrechnungen von 2007 zum Treibhauseffekt:

Gestrichelt: Modell CLIMBER-3 α ,

punktiert: Modell LOVECLIM

nach [44] und [45] mit Daten aus [2], Fig. 10.34b. (Dort liegen zwischen diesen beiden 6 weitere Verläufe zum Emissions-Szenarium (a) aus den Modellrechnungen anderer Autoren. Die vollständige Fig. 10.34 wird in der englischen Kurzfassung wiedergegeben und weiter kommentiert, die in Fußn. 5 zitiert ist.)

(c) Auswirkungen der anthropogenen Abwärme ohne Berücksichtigung des Treibhauseffektes und ohne Gegenmaßnahmen.

Ausgezogene Verläufe: Mit dem DÖPEL-Modell neu berechnete Verläufe der Änderung $\Delta T = \Delta T_e$ der effektiven Strahlungsgleichgewichtstemperatur T_e Erde/Kosmos mit dem jährlichen Steigerungskoeffizienten q der Erzeugung nicht-regenerativer Energie als Parameter, entsprechend $100(q - 1)\%$ Wachstum pro Jahr. ΔT_e aus Gl. (6) gilt bei DÖPEL als Mindestwert für die Zunahme der globalen Oberflächentemperatur T_s infolge der Abwärme.

Punktierte Verläufe: $\Delta T = \Delta T_{ob}$ als ein wahrscheinlicherer Mindestwert für die T_s -Zunahme durch Abwärme, abgeschätzt entsprechend einer „Oberflächen-Variante“ des DÖPEL-Modells.

Dies ist entscheidend für die Gegenüberstellung mit Aussagen zum anthropogenen Treibhauseffekt, wie sie z. B. in Abb. 2b gezeigt sind. Sie ignorieren die Abwärme, ohne dass die dafür vorauszusetzende Beschränkung des Wachstums der Energieproduktion auf verschwindend geringe Werte erwähnt wird. Nach Abb. 2c wären das weniger als 0.5% jährlich, wobei auch erneuerbare Energien lediglich aufschiebend wirken können. Dies wird unter der Zwischenüberschrift „*Erneuerbare Energien*“ am Ende dieses Abschnitts gezeigt.

Die Abwärme blieb auch in neueren Modellrechnungen zum Treibhauseffekt bis zum Jahr 3000 [44a, 44b], 4000 [44c] bzw. 12000 [44d] unberücksichtigt³⁴, die auch nach dem Jahr 2100 zeitabhängige, auf sehr unterschiedlichen Emissionsszenarien basierende CO_2 - Konzentrationsverläufe anstelle der Konstanz in Abb. 2a verwenden. Deren Fiktion einer weitgehenden Irreversibilität des CO_2 -Bestandes über Jahrhunderte und Jahrtausende wird dabei im Prinzip gerechtfertigt³⁵.

An die Stelle des dauerhaft exponentiellen Wachstums für Abb. 2c wäre in optimistischen Szenarien dessen allmählicher Übergang zu der von DÖPEL geforderten, konstanten Energieerzeugung zu setzen. Als ein fiktiver analytischer Ausdruck könnte dafür die logistische Funktion verwendet werden, wie sie für populationsdynamische Modelle üblich ist³⁶.

Die Unterschiede der Temperaturverläufe in Abb. 2c gegenüber DÖPELs Bild 1 [3] sind gering³⁷. Zwischen 1970, dem Startjahr für die Rechnungen DÖPELs, und 2005 wird z. B. in [35] ein mittleres Wachstum des Energieverbrauchs von 2 % pro Jahr angegeben. Daher ist der Unterschied des Verlaufs

³⁴Zu einem Abwärme-Vergleich mit [44d] siehe Fußn. 85 im Abschn. 3.4.

³⁵Entsprechendes gilt für korrigierende Aussagen in [44a] über Voraussetzungen bei den Modellrechnungen zu Abb. 2b. - Aus dem Titel der Arbeit [44b] könnte man einen Ausschluss reversibler Einflüsse ableiten, zu denen die Abwärme gehört. Deren Erwähnung wäre dennoch in der ausführlichen Darstellung zu erwarten gewesen.

³⁶Siehe z. B. [14], Abschnitt 3.3-3.5, auch zu den wahrscheinlicheren Grenzüberschreitungen oder -überschreitungen aus [12a].

³⁷Dessen beide Kurven zu jedem q-Wert für die Temperaturen (in $^{\circ}C$) fallen in unserer Darstellung von Temperaturdifferenzen zusammen und entsprechen den ausgezogenen Kurven.

für $q = 1.02$ in seinem Bild 1 und der Fortsetzung ab dem Jahr 2000 in unserer Abb. 2c besonders klein³⁸. Für die übrigen q -Werte führt ihr Unterschied gegenüber dem aktualisierten 1.02 zwischen 1970 und 2000 zu etwas größeren Abweichungen. Diese bleiben aber immer noch deutlich unter dem Einfluss des Steigerungskoeffizienten q , selbst bei dessen höchsten Werten. Auf letztere konzentriert DÖPEL die Diskussion - dem damals in den Industrieländern gängigen Wirtschaftswachstum entsprechend. Lediglich das hier weggelassene $q = 1.07$ galt ihm als „vielleicht zu hoch gegriffen“. Am unteren Ende der Skala wurde hier $q = 1.005$ hinzugefügt, wobei der besonders weit reichende, annähernd lineare Anfangsverlauf zeigt, dass auch bei geringerem als exponentiellen Wachstum dessen Grenzen absehbar sind.

Rückkopplungs-Betrachtungen

Von DÖPEL wurden Rückkopplungen, die für Aussagen erfasst werden müssen, welche über seine Erwärmungs-Untergrenze hinausgehen, nicht explizit berücksichtigt. Er erwähnt lediglich die zunehmende Verdampfung des ozeanischen Wassers, die mit erhöhter Albedo einer dann dichteren Wolkendecke verbunden ist. Demgegenüber wurden für die Modellrechnungen zum Treibhauseffekt aus Abb. 2b alle bekannten Rückkopplungen modellspezifisch berücksichtigt, womit auch die Unterschiede der Temperaturverläufe aus den 8 Modellrechnungen im gezeigten Bereich zusammenhängen.

Ähnlich groß sind im IPCC-Bericht [2] die Unterschiede zwischen den aus einer weit größeren Anzahl von Modellrechnungen erhaltenen Werten der Temperaturerhöhung bei fiktiver Verdoppelung der CO_2 -Konzentration gegenüber dem vorindustriellen Wert, die im Unterabschnitt „Zur Klimasensiti-

³⁸Dieser Unterschied hängt u. a. mit der bereits erwähnten Verwendung einer höheren Albedo ($A = 0,35$ statt $0,30$ in Gl. (1) zusammen. Vor allem aber liegt der unter Gl. (4) angeführte Startwert $F_{w,o}$ von DÖPEL (mit der Genfer Atomenergie-Konferenz als Quelle) zu hoch gegenüber demjenigen, der mit einem 2 % - Wachstum auf den Wert in Gl. (7) für unsere Abb. 2c führen würde. Daran ändert auch der Abzug von Beiträgen der traditionellen Biomasse-Verbrennung und der Wasserkraft vom 1970-er $F_{h,o}$ wenig, die sich zeitlich nicht stark ändern. Mit zusammen 7 % machen sie die reichliche Hälfte der regenerativen 13 % aus, die oben nach Fußn. 30 für das Jahr 2000 abgezogen wurden.

vität" des Abschnitts 3.4 näher betrachtet wird. Für den sogenannten Gleichgewichtsfall (nach sehr langen Zeiten) ergeben sich als "bester Schätzwert" 3 K , und Werte unterhalb von 1.5 K gelten als "sehr unwahrscheinlich". Dem steht der Verdopplungswert $\Delta T_{e,do} = 1.0\text{ K}$ ohne Rückkopplung gegenüber, so dass die Rückkopplungsfaktoren 3 bzw. 1.5 betragen. Sie schließen den Übergang von der Änderung der effektiven Strahlungsgleichgewichtstemperatur ΔT_e auf die Oberflächentemperatur-Änderung ΔT_s mit ein.

Der letztere Faktor 1.5 wurde für eine sogenannte Oberflächenvariante des DÖPEL-Modells ³⁹ zur Berechnung der punktierten Verläufe in Abb. 1c als ΔT_{ob} verwendet, um wenigstens eine ungefähre Vorstellung von einer Untergrenze für ΔT_s , die dem "sehr wahrscheinlichen" unteren Limit der Klimasensitivität entspricht, zu erhalten. Mit

$$\lambda_{ob}/\lambda_e = 1.5 \quad (8)$$

ergibt sich in Analogie zu Gl. (6):

$$\Delta T_{ob} = 1.5 \cdot \Delta T_e = 0.4 F_w \frac{K m^2}{W} \quad (9)$$

und

$$\lambda_{ob} = 0.4 \frac{K m^2}{W} . \quad (10)$$

Die geringen Unterschiede der hiermit berechneten punktierten gegenüber den ausgezogenen Verläufen der Abb. 2c zeigen, dass sich Änderungen des Prä-Exponentialfaktors relativ wenig auswirken, solange man für die Abwärme am exponentiellen Wachstum festhält.

³⁹Das Forcing bleibt bei dieser Variante unverändert. Sie hat nichts mit einem *surface forcing* zu tun, das manchmal - vorzugsweise für Aerosole - zusätzlich zu unserem radiativen Forcing (s. Fußn. 3) verwendet wird. Beide Größen können sich zeitlich gegenläufig ändern ([2], Fig. 2.23).

Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Rückkopplungsfaktoren aus Abschnitt 3.4 für den stoffspezifischen anthropogenen Treibhauseffekt des CO_2 berechnet wurden, bei dem z.B. auch der Stoffübergang zwischen Atmosphäre und Hydrosphäre mitspielt, während hier nur der Wärmeübergang zu berücksichtigen ist. Andererseits ist auf ältere Rückkopplungsberechnungen bei angenommenen Änderungen der Solarkonstanten oder eines anonymen "Ghost Forcing" [38a] zu verweisen, die vergleichbare Faktoren wie für den Treibhauseffekt lieferten, aber wie die Abwärme nicht stoffspezifisch sind⁴⁰.

Die Zunahme der Oberflächentemperatur liegt also in Abb. 2c nicht nur oberhalb des ausgezogenen ΔT_e wie bei DÖPEL, sondern sehr wahrscheinlich auch oberhalb des punktierten ΔT_{ob} aus der Oberflächenvariante, aber deutlich weniger als eine Größenordnung. Ein wesentlich früheres Eintreten der abwärme-bedingten Temperaturerhöhung als bei den ΔT_{ob} -Verläufen ist also nicht zu erwarten, was die wesentlichste Aussage dieser recht umständlichen und unsicheren Rückkopplungs-Betrachtungen darstellt.

Aufwändigere Rückkopplungsberechnungen speziell für den Abwärme-Einfluss wären wohl angesichts der aussagekräftigen Abschätzung seiner Untergrenze nach DÖPEL nicht lohnend. Eine gemeinsame Berechnung mit dem anthropogenen Treibhauseffekt, dem sich dieser Einfluss in der Realität überlagern würde, wird aber auf sich warten lassen - auch infolge der oben beschriebenen Zurückhaltung des IPCC-Berichts [2-2007] zu dieser Frage. Ihre Behandlung durch die mit großer Rechentechnik ausgestatteten Institutionen (siehe z. B. Fußn. 18) dürfte jedoch kein prinzipielles Problem sein.

⁴⁰Entsprechendes gilt für noch ältere Abschätzungen von (nicht stoffspezifischen) Rückkopplungsfaktoren zum Treibhauseffekt, die lediglich den mit der Temperatur zunehmenden atmosphärischen Wasserdampfdruck und das Abschmelzen von Eis berücksichtigten. Beispielsweise sind in [7] Faktoren mit einem „Unsicherheitsintervall“ von 1.2 bis 4 angegeben, während in [33] (im math. Anhang 4) ein Faktor 2 verwendet wird. Das entsprechende, aktuelle Intervall aus dem Abschnitt 3.4 liegt zwischen 1.5 und 4.5.

Zukunftsansichten für das Wachstum von Energie-Erzeugung und Bevölkerung

Die heutigen Wachstums-Prognosen für die Energie-Erzeugung (mit unterschiedlichen Anteilen aus nicht-regenerativen Energien) bis zur Mitte unseres Jahrhunderts gruppieren sich um die 2 % pro Jahr⁴¹. Damit ergibt sich nach der Näherungsgleichung für die Verdoppelungszeit bei exponentiellem Wachstum

$$t_{dop}/a = \frac{\ln 2}{q-1} \approx \frac{70}{2} = 35$$

eine weitere Verdoppelung bis 2040. Im WBGU-Gutachten von 2003 aus Fußn. 30 wird bis 2050 sogar eine Verdreifachung prognostiziert, entsprechend nahezu 3% pro Jahr. Dem gegenüber entspricht die Prognose des Weltenergiebedarfes [35] einer Zunahme um 1,4 %/a, während im Kommentar zur Studie „*Energiepolitisches Gesamtkonzept 2030*“ von 2007 [36] eine Steigerung „bis zur Mitte dieses Jahrhunderts um mehr als zwei Drittel über den heutigen Stand“ angenommen wird, was reichlich 1 %/a bedeutet.

Diese Zunahme ist vor dem Hintergrund des Wachstums der Weltbevölkerung zu sehen, die von derzeit (2010) fast 7 Mrd. nach einem mittleren UN-Szenario [36a] auf reichlich 9 Mrd. in der Mitte unseres Jahrhunderts zunimmt. Danach durchläuft sie ein flaches Maximum, um nach einem ebenfalls flachen Minimum wieder zuzunehmen (auf nahezu 9 Mrd. i. J. 2300) [36b].

Die heute führenden Industrieländer tragen zum Wachstum der globalen Energieerzeugung und der Weltbevölkerung immer weniger bei, während die gegenwärtigen Schwellenländer bereits den Hauptanteil übernommen haben.

⁴¹Dieser Wert kann für die Zeit bis 2050 den Tabellen TS-3 in [34] zu den Szenarios vom Typ A1B, für den Abb. 2a gilt, entnommen werden. Danach (bis 2100) werden dort etwas abnehmende Werte verwendet. - In unserer Zwischenüberschrift stehen die *Zukunftsansichten* etwa im Sinne der englischen *prospects*. In der (uneinheitlichen) futurologischen Terminologie darf man beim Zeithorizont bis zur Jahrhundertmitte und entsprechenden Szenarios sicherlich "prognostische" Aussagen machen, während allgemeiner und vorsichtiger von Projektionen zu sprechen ist.

Sie werden hier mit den am wenigsten entwickelten zu den "*weniger entwickelten*" Ländern zusammengefasst und den derzeitigen Industrieländern als den "*entwickelteren*" gegenübergestellt⁴².

Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden liegt darin, dass der demographische Übergang, d. h. ein gebremstes Bevölkerungswachstum mit Einmündung in ein Plateau bzw. Maximum [14], für die entwickelteren Ländern bereits in den beiden vergangenen Jahrhunderten vollzogen wurde, während er in den weniger entwickelten frühestens im vorigen Jahrhundert begann und mindestens bis zur Mitte unseres Jahrhunderts andauern wird. In den entwickelteren Ländern ging er mit wachsendem Lebensstandard einher, was vor dem Hintergrund der ursprünglichen bevölkerungswissenschaftlichen Theorie als demographisch-ökonomisches Paradoxon bezeichnet wird [36c].

Im Hinblick auf die Möglichkeiten für eine Fortsetzung dieses Phänomens folgen Angaben bzw. Schätzungen des Pro-Kopf-Energieverbrauchs⁴³ für 2005 bzw. 2050 mit [35, 36a] in den entwickelteren und den weniger entwickelten Ländern (Megawattstunden pro Jahr):

	entwickeltere	weniger entw. L.
2005	64	10
2050	72	16

Trotz des prognostizierten Wachstums der Weltbevölkerung auf das 1 1/2 - fache, das vor allem in den weniger entwickelten Ländern stattfindet, nimmt

⁴²Diese grobe, aber hilfreiche Zweiteilung entspricht z. B. den "*World Population Prospects*" der UN [36a] mit "*more*" versus "*less developed*" zusammen mit "*least developed countries*", wobei diese Gruppierungen und Bezeichnungen auch für die fernere Zukunft beibehalten werden. Sie entsprechen im Wesentlichen den "Annex-1-" und "Nicht-Annex-1-Ländern" der Klimarahmenkonvention [13c]. - Migrationsströme, wie sie entgegen dem Wohlstandsgefälle zu erwarten sind, bleiben dabei unberücksichtigt. Spätestens der durch den Klimawandel verstärkte Migrationsdruck aus den besonders volkreichen, weniger entwickelten in die entwickelteren Regionen dürfte zu wirksameren Gegenmaßnahmen als bisher führen.

⁴³Auch hier werden, wie bei der oben verwendeten globalen Prognose, die Primärenergien aus [35] verwendet, die die Verluste bei der Erzeugung der End- aus der Primärenergie für den Verbraucher mit einschließen. Ebenso wenig wie Migrationsströme der Menschen (Fußn. 42) werden Energieströme berücksichtigt, die z. B. nach dem Wüstenstrom-Projekt aus weniger entwickelten in entwickeltere Länder der Mittelmeer-Region fließen sollen. (S. u. zu Fußn.54).

dort der Pro-Kopf-Energieverbrauch etwa im gleichen Maße zu. Er erreicht aber bis 2050 lediglich 1/4 des Wertes der entwickelteren Länder von 2005⁴⁴. Selbst wenn die damit einher gehende Erhöhung des Lebensstandards für den demographischen Übergang ausreichen sollte, bliebe noch ein erheblicher Aufholbedarf, falls die weniger entwickelten Länder auf den Ansprüchen der entwickelteren bestehen. Dass die weltweite Erfüllung solcher Ansprüche mit einem globalen Kollaps verbunden wäre, weiß man jedoch spätestens seit dem ersten Bericht an den *Club of Rome* [11].

Die Höhe des Wirtschaftswachstums gilt nach wie vor als Gradmesser einer erfolgreichen Politik [36d], da es die Arbeitslosigkeit gegenläufig beeinflusst und für den sozialen Frieden unerlässlich zu sein scheint. Aber es gibt in den entwickelteren Ländern deutliche Anzeichen für eine teilweise Entkopplung vom Wachstum der Energieerzeugung [36f]⁴⁵. Zusammen mit anderen umweltbelastenden Einflüssen wurde dies in einer Schweizerischen Studie für einige europäische Länder sowie für Japan und die USA untersucht [36e]. Die Gegenüberstellung weist die geringsten Entkopplungsfortschritte in der Schweiz aus, was u. a. mit ihrer frühzeitigen, besonders weitgehenden Nutzung von Energiesparmöglichkeiten in Zusammenhang gebracht wird, die wohl auf Grenzen gestoßen sind⁴⁶.

⁴⁴Unter diesen nehmen die US-Bürger mit durchschnittlich 93 MWh/a einen vorderen Platz ein, während die Deutschen im unteren Mittelfeld der "entwickelteren" Länder liegen. Das andere Extrem bilden "*Least developed Countries*" wie Haiti mit weniger als 3 MWh pro Jahr und Kopf: http://www.worldenergy.org/publications/Energy_Policy_Scenarios_to_2050/default.asp. Das globale Mittel liegt bei 20 MWh.

⁴⁵Beispielsweise strebt auch das weniger entwickelte China diese Entkopplung durch wachsende Energieeffizienz ausdrücklich an. Im Übrigen kann sein zweistelliges prozentuales Wirtschaftswachstum eine Arbeitslosenquote um 10% nicht verhindern (http://socio.ch/internat/t_reiser.htm, 2008).

⁴⁶Für Deutschland wird auf Besonderheiten hingewiesen, die mit der Wiedervereinigung zusammenhängen. Beispielsweise betrug der Pro-Kopf-Energieverbrauch in der DDR zuletzt 125% des BRD-Wertes [37a]. - Nach DENNIS MEADOWS wird Deutschland in den kommenden 25 Jahren „mehr Veränderungen erleben als im 20. Jahrhundert zusammen“, wie er 2008 in einem Interview erklärte [12a]. Nachdem der heute 65-jährige mit vielen früheren Vorhersagen Recht behalten hat, ist dies zumindest eine bedenkenswerte Warnung vor vereinfachten Extrapolationen.

Spekulationen über die Kernfusionstechnik, die das Wachstum der Energieerzeugung nach der Jahrhundertmitte betreffen, werden im Abschnitt 4.1 erörtert. Wenn sie realisiert werden kann, sind alle Möglichkeiten, die durch die DÖPELschen Wachstumsszenarien abgedeckt werden, offen.

Globale Ressourcen für nachhaltige Energien

„*Intensivste technische Ausnutzung der eingestrahlten Sonnenenergie*“: So hat DÖPEL seinen Abschnitt 5.3 überschrieben, wobei er ausschließlich die photovoltaische Erzeugungsmöglichkeit elektrischer Energie behandelt. Deren Effizienz setzt er mit maximal 20 % an, die in Zukunft etwas überschritten werden dürften. Den nutzbaren Anteil der reichlich 30 % Festlandsfläche des Globus schätzt er auf 10 %, was als recht hoch gegriffen erscheint. Damit⁴⁷ ergeben sich verfügbare $5 \cdot 10^{14} \text{ W}$, eine halbe Größenordnung mehr als die jüngste IPCC-Abschätzung von 10^{14} W ([2-2007] WG III, Tab. 4.2)⁴⁸. Der Ausnutzungskoeffizient für die insgesamt eingestrahlte Solarenergie ist damit

$$K = 0,2 \cdot 0,3 \cdot 0,1 = 6 \cdot 10^{-3}.$$

Durch Einsetzen in Gl. (2) ergibt das:

$$\frac{F_w}{l_0} = \frac{F_{w,o}}{l_0} q^{\Delta t_K/a} = 0,75 \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

mit dem globalen Energiebedarf F_w und dessen Startwert $F_{w,o}$. Bei ausschließlicher Verwendung von Photovoltaik-Strom bliebe die globale Temperatur bis zum Erreichen dieses Wertes konstant. Aber danach müsste ein weiteres Wachstum des Energiebedarfs aus anderen Quellen abgedeckt werden.

⁴⁷Für die an der Erdoberfläche ankommende Solarstrahlung wird, wie heute üblich [9], die Hälfte der einfallenden, also $l_0/8 = 171 \text{ W/m}^2$ verwendet, während DÖPEL [3] in seine Gl. (3) $(1 - A) l_0/4 = 225 \text{ W/m}^2$ eingesetzt hat. Dieser Wert ist um den Faktor 1,3 größer, was aber für die weiter unten folgenden Abschätzungen unbedeutend ist.

⁴⁸Die dort angegebene Quelle wird alljährlich aktualisiert: <http://www.ren21.net/globalstatusreport/g2009.asp> mit weiteren Links, auch zur Diskussion der IPCC-Abschätzungen. Allgemeineres unter [36g].

Wären diese Zusatz-Beiträge $F_{w,z}$ nicht-nachhaltig, so würden die Mindest-Temperaturen nach Ablauf der Zeit Δt_K gemäß Gl. (5) bzw. (9) , jedoch mit $F_{w,z}$ an Stelle von F_w , wieder ansteigen . Zur Abschätzung wird verwendet:

$$\Delta t_K/a = (\ln q)^{-1} \ln \frac{0,75 \cdot 10^{-3} l_0}{F_{w,o}} \approx \frac{4}{q-1} . \quad (11a)$$

Es ergeben sich⁴⁹ mit den Steigerungskoeffizienten

$q = 1.05, 1.02, 1.01$ bzw. 1.005 für die Zeiten konstanter Temperatur:

$\Delta t_K = 80, 200, 400$ bzw. 800 Jahre (gerundet) ab dem Jahr 2000^{50} ,

das auch für Abb. 2c als Start gewählt wurde. Würde in diesen Zeiträumen nicht-regenerative statt der solaren Energie verwendet, so wäre der Anstieg ΔT_{ob} kleiner als $0.5 K$.

Entsprechendes konstatierte DÖPEL für ΔT_e , und mit seinem Startwert $F_{w,o} = 0.016 W m^{-2}$ von 1970 ergaben sich ähnliche Zeiten Δt_K wie oben. Für das damalige $q = 1.07$ resultierten nur 65 Jahre, entsprechend dem Jahr 2035. Dazu schreibt er, dass solche Zeitintervalle praktisch nicht von Interesse seien, was wiederum einen weit größeren Zeithorizont dokumentiert, als er in der heutigen Klimadebatte üblich ist. Seine Schlussfolgerung in der Zusammenfassung lautet:

„Die einzige Möglichkeit, jenen bedrohlichen Temperaturanstieg zu verhindern, liegt in einem globalen, allmählichen Übergang zur völligen Konstanz der gesamten Energieerzeugung.“

⁴⁹In der englischen online-Kurzfassung aus Fußnote 5 steht ein korrekturbedürftiger, durch Gl. (11a) zu ersetzender Ausdruck. Die resultierenden Näherungswerte für Δt_K bleiben dabei jedoch unverändert (s. a. Fußn. 47).

⁵⁰Bei jeder weiteren Halbierung des jährlichen prozentualen Wachstums steigt Δt_K etwa auf das Doppelte (entsprechend der Näherung $\ln q \approx q - 1$).

Unter der Bezeichnung *Nullwachstum*, die auf das gesamte Wirtschaftswachstum erweitert wurde, fand diese Schlussfolgerung⁵¹ während der 1980er Jahre in Westeuropa vorübergehend Eingang in manche der grünen Parteiprogramme. Eine politisch korrekte Bezeichnung aus der Volkswirtschaftslehre für das Fehlen von Wachstum ist *Stagnation*, die man wohl nicht fordern wird, sondern nur erdulden kann, ebenso wie ein Schrumpfen. Im übrigen unterschieden schon die Autoren des *Club of Rome* [11, 12] zwischen unterschiedlichen Arten des Wachstums, und sie wussten sich gegen den Vorwurf der „Weltuntergangsprophetie“ zu wehren [12, 12a].

Durch die seither eingetretenen wirtschaftlichen Entwicklungen, die mit der Durchsetzung der parlamentarischen Demokratie in Teilen Osteuropas einhergingen, haben sich zudem neue Möglichkeiten ergeben. So entstand beispielsweise in einer ostdeutschen Region, die vormals höchste Umweltlasten verursachte, mit dem „*Solar Valley*“ das führende Gebiet Europas für Photovoltaik⁵². Auch neue technische Aspekte haben sich aufgetan, die gegenwärtig in aller Munde sind. Hier soll lediglich, wieder unter dem Motto „*Ausnutzung der Sonnenenergie*“, die technisch längst mögliche, aber erst jetzt anlaufende Stromerzeugung durch solarthermische Kraftwerke hervorgehoben werden⁵³. Im „Sonnengürtel der Erde“ sind dabei ähnliche Wir-

⁵¹ Unter dem nach ungebremsstem Wachstum strebenden DDR-Regime, das dabei den Westen überholen wollte, waren solche Folgerungen äußerst missliebige. Das *Nullwachstum* wurde z. B. in [37] als „*utopisch-reaktionäre politische Schlussfolgerung*“ bezeichnet, und DÖPELS Publikation [3] galt bei der Leitung der TH Ilmenau als unverantwortlich. Schon deshalb konnte sein Schlusssatz mit „*einer weltweiten sozialistischen Orientierung*“ für eine „*dauerhafte harmonische Lösung*“ nicht auf den *real existierenden Sozialismus* bezogen werden. (Vgl. Fußn. 25.) Vielmehr wurde DÖPEL nach dem *Prager Frühling* von 1968 - zu Recht - des Eintretens für einen *Sozialismus mit menschlichem Anlitz* verdächtigt.

Wem DÖPELS Kapitalismus-Kritik [3] zu hart erscheint, der sei beispielsweise auf die aktuellere Darstellung des Schweizer ROGER DE WECK [37B] verwiesen. Auch er wendet sich gegen ein „*Wachstum um jeden Preis*“, und er spricht von der Hoffnung, die Angst der Erdenbürger vor der Erderwärmung könne die „*gemeinschaftsbildenden Werte der Mitmenschlichkeit und Solidarität wiederbeleben, je spürbarer die Bedrohung wird.*“

⁵² Es umfasst ehemals hochindustrialisierte Teile von Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt (<http://www.solarvalley.org>), denen zwar kein Tal gemeinsam ist, wohl aber die Hoffnung auf *blühende Landschaften*. Sie wird durch die Finanzkrise mit Drosselung der Förderung sowie durch chinesische Konkurrenz gedämpft.

⁵³ Bereits 1992 wurde von der zuständigen Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages

kungsgrade wie mit der Photovoltaik erreichbar, mit der sie auch kombinierbar ist. Von Vorteil ist die solarthermische Speichermöglichkeit für tagsüber anfallende Wärme, die bei Bedarf freigesetzt werden kann. - Speziell in der Mittelmeer-Region ergeben sich mit dem Wüstenstrom-Projekt DESERTEC⁵⁴ große Möglichkeiten.

Nach der obigen Gegenüberstellung liegt die Abschätzung der solaren Ressourcen nach DÖPEL um einen Faktor 5 unter derjenigen in Tab. 4.2 aus [2-2007], WG III. In dieser Spanne liegen die übrigen, dort eingetragenen erneuerbaren Energiere Ressourcen - mit Ausnahme der geothermischen, für die der dreifache Wert der solaren angegeben ist. Hierbei ist jedoch zu unterscheiden zwischen der ausschließlich zur Heizung (meist mittels Wärmepumpe) dienenden oberflächennahen und der Tiefen-Geothermie⁵⁵. Nur die Letztere kann wesentlich zur globalen Energieerzeugung beitragen. Sie ist bei der anthropogenen Abwärme zu berücksichtigen. Ihr gegenüber hat die oberflächennahe Geothermie, die zu den nachhaltigen Quellen zu rechnen ist, ein weitaus geringeres Potential aufzuweisen.

Somit bleiben wir im Rahmen der groben, aber doch international abgestimmten Abschätzungen der IPCC-Tabelle für die Gesamtheit der abwärmeneutralen und damit nachhaltigen Energien bei den oben nach Gl. (11a) angegebenen Zeiten als der Obergrenze, ab der wieder Abwärme liefernde Energien benötigt würde. Zur weiteren Verdeutlichung sei angegeben, dass die beim

[23] auf das „in fast 20 Jahren Forschung, Entwicklung und Demonstration Erreichte“ verwiesen und dringend ein solarthermisches Musterkraftwerk in einem südlichen Partnerland empfohlen. Solche Kraftwerke sind nun entstanden, und man hofft auf baldige wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit - nach mehr als 4 Jahrzehnten mit Energien, die eigentlich höhere (externe) Kosten verursacht haben [36g]. Das DPG-Informationsblatt "PhysikKonkret" Nr. 5 vom September 2009 enthält weitere Informationen mit Internet-Links: http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/physik_konkret/index.html.

⁵⁴Zur Versorgung von Europa, dem Nahen Osten und Nordafrika: <http://www.desertec.org/de/konzept>.

⁵⁵Ab etwa 400 m Tiefe laut Glossar in [36g]. Man kann diese Energiequelle als "quasi erneuerbar" bezeichnen. Zur Erdwärme trägt die Radioaktivität der Erdrinde in vergleichbarem Ausmaß wie die sog. Restwärme aus der Erdentstehung bei. Ihre Vernachlässigbarkeit im natürlichen Wärmestrom konstatiert DÖPEL [3] in einer Fußnote zu seiner globalen Strahlungsbilanzgleichung (1), worin der terrestrische Wärmestrom insgesamt zu vernachlässigen ist, einschließlich des Beitrags von Geysiren.

Wachstum des Verbrauchs an nachhaltigen Energien um 2% pro Jahr errechnete Obergrenze von 200 Jahren nahezu halbiert würde, wenn der Pro-Kopf-Verbrauch weltweit den Wert der USA aus Fußnote 44 annähme. Die Kinder heute lebender Kinder könnten diese Grenze noch erleben.

Auch das neue Buch von AL GORE zur Klimakrise [56a] zeugt bei aller Kritik an den Verursachern beider Krisen von ungebrochenem Wachstumsdenken⁵⁶ und vom weit verbreiteten Glauben an die künftige Verfügbarkeit *”nahezu unbegrenzter Strommengen ... aus Solar-, Wind- und geothermischen Generatoren ...”*, wie er in einer abschließenden Vision schreibt⁵⁷. - Sein Buch bietet viele wichtige Argumente gegen die *”sogenannten Klimaskeptiker”*, die er als Klima-Leugner bezeichnet. Interessant ist auch eine skeptische Erörterung des *”Solarstroms aus dem Weltraum”*, die es als vertretbar erscheinen lässt, dass diese Möglichkeit bei unseren Betrachtungen nicht berücksichtigt wurde.

Zur Abwärme wurden in der neueren Literatur keine Überlegungen gefunden. Man muss wohl davon ausgehen, dass die zwar in einer kleinen wissenschaftlichen Hauszeitschrift publizierte, aber von einem namhaften Physiker stammende Arbeit [3] - ebenso wie einschlägige Prognosen und Warnungen in besser zugänglichen Schriften aus den 1970er Jahren (Abschnitt 2) - weitgehend vergessen ist. Der mittel- bis langfristig mögliche Abwärme-Einfluss wird derzeit ignoriert, ohne dass die dazu vorauszusetzenden Wachstumsbeschränkungen bei den Prognosen bis zum Ende des Jahrtausends benannt

⁵⁶ Angesprochen auf den Energieverbrauch in seiner Familie, der deutlich mehr als eine Größenordnung über dem US-amerikanischen Pro-Kopf-Verbrauch aus Fußnote 44 liegt, verwies GORE auf seine umfangreiche Förderung dieser Energien, ohne die Angaben für seinen Verbrauch zu dementieren [56b]. Sollte jedoch der globale Pro-Kopf-Verbrauch auf seine Höhe gebracht werden, so würden etwas mehr als die oben zu Gl. (11a) abgeschätzten $5 \cdot 10^{14} \text{ W}$ an nachhaltigen Energien benötigt, die auf der Erde insgesamt zur Verfügung stehen. Nicht nur die weltweite Übernahme des Lebensstandards der entwickelteren Länder und besonders der heutigen Führungsschicht, sondern auch ein entsprechender Verbrauch ausschließlich nachhaltiger Energien führt somit zu absurden Konsequenzen.

⁵⁷ 2008 forderte Gore sein Land auf, binnen 10 Jahren den kompletten Elektrizitätsbedarf aus erneuerbaren Energien zu decken (www.algore2008.de). Mit Bezug auf diese Vision erschien 2009 in Kalifornien eine universitäre Studie [56c], nach der binnen 20 Jahren der gesamte Energiebedarf der Erde aus erneuerbaren Energien (einschl. Erdwärme) gedeckt werden könnte.

werden. In Deutschland und anderen Industrieländern, wo mit der Forderung nach Sicherheit bis zu 10^6 Jahren die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Frage gestellt wird, ist dies am wenigsten zu verstehen⁵⁸. Jedenfalls sollte der mittel- bis langfristig mögliche Abwärme-Einfluss bei entsprechenden Prognosen benannt werden, zusammen mit den zur Vernachlässigung vor auszusetzenden Wachstumsbeschränkungen der Energieerzeugung.

Die Computersimulationen der globalen Erwärmung, beispielsweise zu Abb. 2b, betreffen bislang ausschließlich den anthropogenen Treibhauseffekt, der weit dringender zu bekämpfen ist. Er wird unter Beschränkung auf die wesentlichen, solche Modellrechnungen betreffenden Aspekte im Abschnitt 3.4 einbezogen. Zuvor werden unter 3.3 gemeinsame konzeptionelle Fragen behandelt.

3.3 Das Forcing-Konzept und die Sonne

Wird die durch Gl. (1) beschriebene Gleichheit zwischen der von der Erdatmosphäre aufgenommenen Solarstrahlung und der ausgesandten infraroten Temperaturstrahlung gestört, so wirkt die Differenz der Strahlungsstromdichten als (Anfangs-)Triebkraft oder Forcing für die Wiedereinstellung des Strahlungsgleichgewichts. Bei diesem Vorgang nimmt die Triebkraft auf Null ab, während für das Forcing stets der Anfangswert angegeben wird.

Nach einer „*standard definition*“ (in [2, 38]) ist das Forcing allgemein gegeben durch die Netto-Strahlungsstromdichte in die Troposphäre an ihrer Obergrenze, der Tropopause. Wie im Anschluss an Gleichung (1) beschrieben, liegt in diesem Grenzbereich für das Wettergeschehen ein Temperaturminimum mit aufliegendem „Inversionsdeckel“ vor. Dadurch ist eine relativ gut definierte Situation gegeben. Zudem erfolgt die thermische Gleichgewicht-

⁵⁸Bei dieser Gegenüberstellung ist allerdings zu beachten, dass die Abwärme jederzeit auf Kosten der nicht nachhaltigen Energieerzeugung gedrosselt werden kann, während die Radioaktivität naturgesetzliche Abklingzeiten hat. - Weitere Überlegungen zur Kernenergie folgen im Abschnitt 4.1.

seinstellung in der Stratosphäre⁵⁹ und darüber wesentlich rascher als in der Troposphäre, deren größere thermische Trägheit vor allem durch die Kopplung an die Ozeane bedingt ist. Ohne diese Kopplung würde sich für die troposphärische Gleichgewichtseinstellung weniger als ein Monat ergeben. Bei Einbeziehung des oberen Ozeans dauert sie Jahre bis Jahrzehnte und mit dem tiefen Ozean und dem Eisschild Jahrhunderte bis Jahrtausende (laut [2], Box TS.9).

Für das Forcing F gilt innerhalb der Troposphäre die Fiktion eines unveränderten Temperaturverlaufs. Im Sinne eines Gedankenexperiments wird schließlich auch hier die thermische Gleichgewichtseinstellung für alle Prozesse zugelassen, deren Forcings sich additiv zu F zusammensetzen. Dabei steigt die Temperatur an der Erdoberfläche um

$$\Delta T_s = \lambda F \quad (12)$$

als *Response* in dieser *Forcing-Response-Beziehung*. Der (Klima-)SensitivitätsParameter⁶⁰ λ gibt die Änderung der globalen Jahresmitteltemperatur bei Änderung des Forcings um eine Einheit an.

Der Fall mit $\lambda = \lambda_e$ aus Gl. (7), aber ΔT_s statt ΔT_e aus Gl. (6), wird in einem Review-Artikel von BONY [38C] als einfachste Form des "PLANCK-Response" auf die Schwarzkörperstrahlung bezeichnet⁶¹. Dabei wird verzö-

⁵⁹Das dabei resultierende F wird auch als *stratosphärisch adjustiertes Forcing* (F_a in [38] Fig. 2; s. a. [2] Fig. 2.2) vom ursprünglichen *instantanen Forcing* (F_i) unterschieden, das hier ebenso wenig verwendet wird wie weitere Varianten aus diesen Literaturquellen.

⁶⁰Nicht zu verwechseln mit der Klimasensitivität als einem speziellen CO_2 -Forcing aus Abschnitt 3.4. Diese wird - im Unterschied zur hier verwendeten Terminologie aus [2]- z. B. in [7] als *Klimasensitivitäts-Parameter* bezeichnet, während z. B. in [38] umgekehrt λ als *Klimasensitivität* deklariert wird. Die Dimension schafft hier Klarheit.

⁶¹Ogleich SANDRINE BONY ein "Lead Author" des Kapitels 8 im IPCC-Bericht [2] ist, hat sie diesen Fall nicht dorthin übernommen. Wohl aber ist dort (in einer Fußnote 6) die für den Treibhauseffekt ohne Rückkopplung verwendete Variante angegeben, für die (als negativ reziproker "*Planck feedback parameter*"', aber mit der Symbolik des Glossars zu [2]) $\lambda = 0.31$ (statt $\lambda_e = 0.27$) Km^2/W gilt. Das entspricht der Voraussetzung einer vertikal und horizontal einheitlichen Temperaturänderung, die sich allerdings laut Fußnote A1 im Appendix A zu [38C] bei der aufwändigen Berechnung nicht streng einhalten lässt. - Übrigens wurde die dort getroffene,

gerungsfreie Einstellung des Strahlungsgleichgewichtes mit dem aktuellen Forcing F angenommen. Eine solche „Änderung bei währendem Gleichgewicht“ (eigentlich: Fließgleichgewicht bei Quasistationarität [14]) war Voraussetzung bei den Abschätzungen des vorigen Abschnitts mit Gl. (9) und (10) für die „Oberflächen-Variante“ des DÖPEL-Modells, also bei $\lambda = \lambda_{ob}$.

Für die natürliche Veränderung der solaren Strahlungsflussdichte I_s aus Gl. (3) um ein Forcing F_s gilt ohne Rückkopplungen [38b]⁶²:

$$\Delta T_s = \Delta T_e = 0.27 F_s. \quad (13)$$

Für die 11-Jahres-Zyklen der Sonnenflecken mit einem Unterschied von 0.08 % zwischen maximaler und minimaler Strahlungsflussdichte [2], entsprechend einem $F_{s,cycl} = 0.2 W/m^{-2}$, resultiert ohne Rückkopplungen

$$\Delta T_{s,cycl} = 0.05 K. \quad (14)$$

Die gleiche Größenordnung (zwischen 0.02 und 0.08 Grad) ergibt sich bei diesem Versuch auch für den Beitrag zur Zunahme der globalen Temperatur seit 1750, der noch kaum verstanden wird [2]. Unsicherheit besteht zudem hinsichtlich sekundärer Einflüsse wie einer veränderten Keimzahl für die Wolkentröpfchenbildung durch das Variieren der kosmischen Strahlung infolge Modulation des Erdmagnetfeldes. Dabei gilt aber [25]:

„In der Zeit stärkster Erwärmung während der vergangenen 25 Jahre hat die Sonne nicht zu ihr beigetragen.“

Das Gegenteil wird beispielsweise in [39] von einem Meteorologen mit juristischer Attitüde verkündet, wobei das Kohlendioxid „freigesprochen“ wird.

unübliche Einordnung des *Planck response* als *most fundamental feedback* ebenfalls nicht in [2] übernommen.

⁶²Dabei ist die Annahme einer vertikal unveränderten Temperaturverteilung eher erfüllt als beim anthropogenen Treibhauseffekt. Für ihn wird mit dieser Annahme ohne Rückkopplung $\lambda = 0.29 K m^2/W$ angegeben, was dem Vergleich mit Fußnote 61 im Abschnitt 3.4 dienen soll.

Im Gegensatz dazu schließt z. B. auch das Max-Planck-Institut für Sonnensystem-Forschung in einer Pressemitteilung *„die Sonne als Verursacherin der gegenwärtigen globalen Erwärmung aus“*, wobei die früheren Einflüsse ein *„Gegenstand weiterer Forschung“* sind [40]. - Aus der Beobachtung, *„dass sich die Sonne zurzeit in der tiefsten und längsten Ruhephase seit fast einem Jahrhundert befindet“*, ist auch für den Fall, dass sich diese Phase bis zum Ende unseres Jahrhunderts fortsetzt, nicht auf eine wesentliche Verminderung des Temperaturanstiegs (um mehr als 10%) zu schließen, der für weiterhin zunehmende Treibhausgasemissionen bis dahin berechnet wurde [40a]⁶³.

Wegen der erwähnten Unsicherheiten wurde z. B. in [38] vom solaren Forcing (als einer in früheren Publikationen benutzten Bezugsgröße) zum besser verstandenen CO_2 mit dem größten anthropogenen Forcing übergegangen, das auch vom IPCC bevorzugt und im nächsten Abschnitt behandelt wird.

⁶³Immerhin ist im Hinblick auf die im Abschn. 3.4 diskutierte *„2-Grad-Grenze“* über der vorindustriellen Temperatur, die eine Wunsch-Grenze bei 1,3 Grad gegenüber heute bedeutet, die für eine weiterhin *„ruhende Sonne“* errechnete Anstiegs-Verminderung um bis zu 0,3 Grad nicht unwesentlich.

3.4 Einbeziehung des anthropogenen Treibhaus-Effekts

Angesichts der sehr umfangreichen Materialien zu den Ursachen und Folgen der aktuellen globalen Erwärmung⁶⁴ kann es in diesem Abschnitt lediglich um Hintergrundinformationen zu Abb. 2a und b (im Abschnitt 3.2) sowie um allgemeine Gegenüberstellungen gehen. Sie sind angesichts gewisser Lücken zwischen fach- und populärwissenschaftlicher „Treibhaus-Literatur“ sowie zwischen Klimatologie und „simpler Physik“ [25a] vielleicht hilfreich. Der naturwissenschaftliche Hintergrund bekannter Auswirkungen der Treibhausgas-Emissionen wird hier auf vereinfachende Weise quantifiziert, wobei unsichere und in aktuellen Forschungs-Darstellungen besonders betonte Einflüsse nicht (explizit) berücksichtigt werden⁶⁵.

Treibhausgase und ihre Wirkungen

Während die Forcings aus den beiden vorangegangenen Abschnitten als Zusatzbeiträge zur kurzwelligen, solaren Strahlungsflussdichte in der Strahlungsgleichung (1) rechtsseitig zu addieren waren, ist das Forcing, das aus dem anthropogenen Treibhauseffekt resultiert, vom langwelligen Beitrag auf der linken Seite abzuziehen. Damit resultiert ebenfalls eine Ungleichung (entsprechend Gl.(1): links < rechts). Der Effekt ist primär durch infrarot-aktive,

⁶⁴ Allein die IPCC-Berichte sind, auch ohne die zu ihrem Verständnis notwendigen Originalarbeiten, mit viertstelligen Seitenzahlen äußerst umfänglich, was nicht zuletzt dem Streben nach Konsens und nach geringer Anfechtbarkeit der Darstellungen - auch von außerhalb der Wissenschaft - geschuldet ist. Jedoch sind dadurch die strengen "*Principles Governing IPCC Work*" (<http://www.ipcc.ch/pdf/ipcc-principles/ipcc-principles.pdf> mit Appendices A-C) kaum durchgängig einzuhalten. Ein besonders medienwirksames Beispiel war die Prognose des Verschwindens der Himalaja-Gletscher in drei Jahrzehnten nach [2-2007] mit einer Selbstkritik von 2010: <http://www.ipcc.ch/pdf/presentations/himalaya-statement-20january2010.pdf>.

Auch wenn die (absehbare) Falsifizierung einen Einzelfall darstellt, brachte dies bedenkliche Vertrauensverluste sowie Reform-Überlegungen zur Vermeidung solcher Pannen und allgemeinerer Probleme mit sich [25c]. Der UN-Generalsekretär hat die internationale Dachorganisation der Wissenschaftsakademien (IAC) als unabhängiges Kontrollgremium mit der IPCC-Beratung betraut (laut Pressemitteilung vom 21.3.2010 unter www.ipcc.ch/press_information/press_information.htm).

⁶⁵ Dazu gehört z. B. die Kryosphäre mit dem bereits von DÖPEL erwähnten Abtauen der Eisschilde, das in den Prognosen implizit erfasst ist.

also mehr als zwei Atome enthaltende Gasmoleküle mit veränderlichem Dipolmoment bedingt [41]. Sie absorbieren einen Teil der von der Erdoberfläche ausgesandten Wärmestrahlung und tragen durch ihre Emission sowohl zur Oberflächenerwärmung durch Rückstrahlung, als auch zur Abstrahlung in den Weltraum wesentlich bei (zusammen mit den Wolken).

Die Berechnung des Forcings schließt an den natürlichen Treibhauseffekt an und nutzt die wohlbekannten Molekülspektren in eindimensionalen Strahlungstransportmodellen [9] für die Energieübertragung, wobei global über längen- und breitenabhängige vertikale Profile gemittelt wird [42]. So ergibt sich beispielsweise für das globale CO_2 –Forcing der vom IPCC ab [2-2001] übernommene Näherungsausdruck⁶⁶:

$$F_c = 5.35 \frac{W}{m^2} \ln \frac{[CO_2]}{280 \text{ ppmv}}. \quad (15)$$

In Abb. 1b (Abschnitt 2) entspricht die rechte, logarithmische Ordinatenskala dieser Funktion mit 280 *ppmv* als vorindustriellem Startwert von 1750⁶⁷. Für 2005 beträgt das CO_2 –Forcing $F_c = 1.66 W m^{-2}$. Diesem größten der insgesamt 13 Beiträge ist das (anthropogen + solar) resultierende Forcing F_{res} praktisch gleich:

$$F_{res} = 1.6 W m^{-2} \approx F_c.$$

Alle übrigen Beiträge kompensieren sich zufälligerweise weitgehend. Der sich für F_{res} ergebende Unsicherheitsbereich ist dabei um ein Mehrfaches größer als für F_c . (Vgl. [2], Fig. SPM 2.)

Die nächstkleineren positiven Beiträge liefern Methan, troposphärisches Ozon⁶⁸ sowie die bereits beim stratosphärischen Ozon mit Fußn. 16 erwähn-

⁶⁶Vorher wurde ein vorlogarithmischen Faktor 6.3 an Stelle von 5.35 in Gl. (15) verwendet [2-1994], was in der 1. Auflage falsch eingeordnet wurde. (Vgl. Fußn. 74.)

⁶⁷In den Jahren von 1000 v. Chr. bis 1750 variierte die Konzentration lediglich zwischen 275 und 285 *ppmv* [2]. Daher werden 280 *ppmv* gegenüber den manchmal (z. B. in [38]) stattdessen verwendeten 291 *ppmv* von 1880 bevorzugt.

⁶⁸Zu deren Wechselwirkung sowie zu weiteren physikochemischen Aspekten des Treibhauseffektes siehe [14].

ten Halogenkohlenwasserstoffe, deren Verminderung die vorerst stärkste Verlangsamung des anthropogenen Treibhauseffektes gebracht hat. Den größten subtraktiven Beitrag liefern die Aerosole durch erhöhte Rückstreuung (direkt oder durch Wolken). Wegen einer weiteren, knappen Diskussion der einzelnen Beiträge sei z.B. auf [25] und auf [2] (FAQ 2.1) verwiesen.

Wichtiger als die aktuellen Forcing-Werte sind deren künftige Entwicklungen. Dafür sind auch die effektiven Lebensdauern [14] der jeweiligen Spezies maßgebend. Sie unterscheiden sich wegen deren unterschiedlicher chemischer Beständigkeit und atmosphärischer Verweilzeit um Größenordnungen⁶⁹. Zusammen mit den Naturgegebenheiten, zu denen auch unvorhergesehene Ereignisse wie Vulkanausbrüche gehören, bestimmen menschliche Aktivitäten die Entwicklung der Emissionen. In die politikabhängigen Emissions-Szenarien, von denen bereits ein breites Spektrum für die Computersimulation getestet wurde ([34],[2-2007]), sollte perspektivisch auch die Emission der Abwärme einbezogen werden.

Der letztendlich interessierende globale Temperaturverlauf mit der Zeit wird nach der „*Forcing-Response-Beziehung*“ (12) primär vom Forcing bestimmt. Sekundär trägt der Sensitivitätsparameter λ im allgemeinen ebenfalls zur Zeitabhängigkeit von ΔT_s bei, während er ursprünglich als zeitlich unveränderlicher Proportionalitätsfaktor (wie in Gl. (9)) konzipiert war. Vor allem hängt er vom jeweiligen Klimamodell ab. Zu seiner Berechnung müssen neben dem Strahlungstransport die Konvektionsprozesse mit dem Transport fühlbarer und latenter (Verdampfungs-)Wärme sowie diverse Rückkopplungen[38c] (s. Fußn. 61) berücksichtigt werden.

Beispielsweise steigt der gehalt der Troposphäre entsprechend der H_2O -Dampfdruckkurve mit der Temperatur, was den Treibhauseffekt erheblich

⁶⁹Als eine Hilfe für Vorhersagen gibt man das Globale Erwärmungspotential (GWP: *Global Warming Potential*) an, das auf CO_2 mit dem $GWP = 1$ bezogen wird. Es ergibt sich aus dem Produkt der effektiven Lebensdauer mit dem zeitlich integralen Forcing einer Masseinheit der jeweiligen atmosphärischen Spezies in Relation zu demjenigen von CO_2 . Durch Multiplikation mit der perspektivisch emittierten Masse ergibt sich die „äquivalente CO_2 -Emission“. - Das Kyoto-Protokoll beruht auf den Werten für einen Zeitrahmen von 100 Jahren.

verstärkt⁷⁰. Bei der Wechselwirkung mit dem Ozean ist hier außer dem ebenfalls bereits erwähnten Wärmeübergang auch der Stoffübergang zu berücksichtigen. Die Löslichkeit ist temperaturabhängig und beim CO_2 durch die Bildung von Kohlensäure und deren Dissoziation mitbestimmt [14]. Dadurch nimmt die Versauerung des Ozeans zu, wobei die Auswirkungen auf den marinen Kohlenstoffhaushalt gravierend, aber noch unsicher sind ([2]Box 7.3).

- Die Prozesse in der Biosphäre werden bislang meist mit Größen und Parametern vorgegeben und nicht - wie die geophysikalischen Prozesse - durch Systemgrößen beschrieben, die sich während der Simulation dem globalen Wandel anpassen können.

Über Klima-Modelle

Im Unterschied zu den eindimensionalen Modellen, die im Zusammenhang mit Gl. (15) erwähnt wurden, dienen zur Klimasimulation dreidimensionale Zirkulationsmodelle ([9], Abschnitt 11.5; [14], Abschnitt 1.3.7). Die zugehörigen, umfangreichen Gleichungssysteme, die im Prinzip eine vollständige Beschreibung der physikalischen Prozesse enthalten, sind nur numerisch lösbar. Dafür sind höchste Rechenleistungen erforderlich. In Art und Ausmaß der Berücksichtigung physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse unterscheiden sich die Globalen Zirkulations-Modelle (GCMs) innerhalb der Hierarchie unterschiedlicher Komplexität ([2] Box TS.8).

Besonders für größere Zeithorizonte bewähren sich „EMICs“ (*Earth System Models of Intermediate Complexity*), wie sie für Abb. 2b zur globalen Simulationen bis zum Jahr 3000 eingesetzt worden sind. Sie stehen in der Hierarchie unterhalb der Atmosphäre-Ozean-Zirkulationsmodelle (AOGCMs) mit der höchsten Komplexität, die wegen ihres Rechenaufwandes im Zeithorizont relativ beschränkt und z. B. bei regionalen Betrachtungen vorteilhaft sind, die hier nicht zur Debatte stehen. Für Tab. 8.3 und Fig. 10.34 in [2],

⁷⁰Dies wird nicht beim Forcing berücksichtigt, weil H_2O als einziges Treibhausgas zugleich flüssig bzw. fest vorliegt. - Zum natürlichen Treibhauseffekt trägt H_2O zusammen mit den Wolken weit mehr als die Hälfte bei.

die unsererer Abb. 2b zugrunde liegen, lieferten sie (nicht eingetragene) Anfangsverläufe bis zum Jahr 2300, die mehr im oberen Temperaturbereich der EMIC-Resultate liegen.

Das bis zum Jahr 2100 für alle 8 EMICs benutzte Szenario A1B wird in [34] (Tab. TS-3) näher charakterisiert (s. a. Fußn. 41). Unter den drei Typen der A1-Familie nimmt es gegenüber dem *fossil-intensiven* und dem *nicht-fossilen* Typ eine moderate Stellung ein. Die A1-Familie wiederum steht unter den drei Familien, die in [2] für längerfristige Betrachtungen (z. B. zu Fig. 10.4) bevorzugt werden, als gemäßigt zwischen Familie B1 und A2. (Vgl. auch [2-2007] WG II, Box 2.8.)

Das Klima der fernerer Vergangenheit, soweit es aus paläoklimatischen Daten erschlossen ist, wird heute in wesentlichen Zügen durch die Modelle erfasst und mit seinen Extremereignissen zu Testzwecken verwendet ([2], Abschnitt 9.3.4). Für das Industriezeitalter liefern Ensembles von Modellrechnungen unterschiedliche Temperaturverläufe mit und ohne den anthropogenen Treibhauseffekt ([2], Fig. 9.5), wobei im letzteren Fall die Übereinstimmung mit den Messwerten zunehmend schlechter wird. Ab etwa 1970 laufen die Kurven wie eine Schere auseinander. Dabei entspricht das obere Scherenblatt auch weiterhin dem gemessenen Verlauf aus Abb. 1a (Abschnitt 2), während das untere der Realität widerspricht. Das Vertrauen in die Vorhersagefähigkeit der Modelle wird durch diese Gegenüberstellung stark gestützt ([2], FAQ 2.1).

Zur Klimasensitivität

Alternativ zum *Klimasensitivitätsparameter* λ wird nicht selten (und vom IPCC fast nur noch) die *Klimasensitivität* S als Temperaturzunahme bei Verdopplung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration gegenüber dem vorindustriellen Wert, also auf 560 ppmv, angegeben⁷¹. Speziell bei der Gleich-

⁷¹Für unsere Zwecke wäre eine weitestmögliche Verwendung von λ zwar klarer, aber weniger anschaulich und für die Literatur-Vergleiche ungünstig.

gewichts-Klimasensitivität S^{gl} ([2], Box 10.2) legt man sich auf einen sogenannten Gleichgewichtsfall fest, in dem sich die Temperatur nach dem jeweiligen Modell nicht mehr merklich ändert. Dafür gilt mit Gl. (15)⁷²:

$$S^{gl} = \Delta T_{s,do}^{gl} = \lambda^{gl} \frac{W}{m^2} \cdot 5.35 \ln 2 = 3.7 \cdot \lambda^{gl} \frac{W}{m^2}. \quad (16)$$

S^{gl} bzw. λ^{gl} ermöglichen von den Emissions-Szenarien unabhängige Vergleiche der unterschiedlichen Modelle. Aus zahlreichen Modellläufen und deren statistischer Auswertung ([2], Box 10.2) ergab sich, dass S^{gl} *wahrscheinlich*⁷³ zwischen 2 und 4.5 Grad und der *beste Schätzwert* bei 3 Grad liegt. Dies zeigt bereits, dass eine CO_2 –Verdoppelung gegenüber dem vorindustriellen Wert, entsprechend einem Anstieg auf das 1 1/2 -fache der gegenwärtigen Konzentration, sehr riskant wäre. - Aus den 3 Grad kann man rückwärts mit Gl. (16) einen *besten Schätzwert*

$$\lambda^{gl} = 0,8 \frac{K m^2}{W} \quad (16a)$$

ausrechnen.

Im Abschnitt 3.2 wurden unter der Überschrift "*Rückkopplungsbetrachtungen*" Ergebnisse zur Klimasensitivität vorweggenommen. Mit $\lambda_e = 0.27 \frac{K m^2}{W}$ und Gl. (15) ergibt sich als Bezugswert einfacherweise:

$$S_e^o = \Delta T_{e,do} = 1.0 K. \quad (17)$$

⁷²Für die anderen Treibhausgase gelten nach [42] ganz andere Funktionalzusammenhänge, was die Verallgemeinerung ebenso erschwert wie die unterschiedlichen Verweilzeiten bei Verwendung der sog. Äquivalent-Konzentration (vgl. Fußn. 69). Diese hat das gleiche Forcing wie eine vorgegebene Mischung von CO_2 mit anderen Treibhausgasen (und evtl. Aerosolen; siehe [2], SYR-Topic 2.1).

⁷³Die Wahrscheinlichkeit ist >66% nach der in Fußn. 1 genannten deutschen Zusammenfassung zur SPM [2].

Mit dieser rückkopplungsfreien Zunahme⁷⁴ der effektiven Strahlungsgleichgewichtstemperatur T_e der Atmosphäre bei CO_2 –Verdoppelung resultieren die in Abschn. 3.2 verwendeten Rückkopplungsfaktoren 3 bzw. 1,5 als „*bester Schätzwert*“ bzw. „*sehr wahrscheinliche*“⁷⁵ Untergrenze. Der letztere Wert führte auf ΔT_{ob} mit den punktierten Verläufen in Abb. 2c (Abschnitt 3.2), die als aktualisierte Untergrenze der Oberflächentemperatur-Änderung durch Abwärme gelten dürfen. Die wahrscheinliche Obergrenze $S^{gl} = 4.5 K$, die zu Gl.(16) genannt wurde, entspricht einem Faktor 4,5 für ΔT_e , der immer noch wenig im Vergleich zum Kurvenschar-Parameter q ändert.

Während die Gleichgewichtswerte S^{gl} und λ^{gl} *per definitionem* temperaturunabhängig sind, tritt bei den *effektiven Klimasensitivitäten* S^{eff} und den entsprechenden Parametern λ^{eff} schon wegen der Trägheit des Klimasystems eine zeitliche Veränderlichkeit auf, und zwar aktuell eine Zunahme⁷⁶. Anschließend an eine Stabilisierung des Forcings ist noch eine Temperaturzunahme um $0.5 K$ und mehr zu erwarten, die hauptsächlich innerhalb der nächsten 100 Jahre eintritt ([2], Abschnitt TS.5.5). An den Verläufen in Abb. 2b (Abschnitt 3.2) nach der fiktiven Konstanz der CO_2 –Konzentration ab dem Jahr 2100 ist das gut zu erkennen⁷⁷.

⁷⁴Sie wird hier wegen ihres einfachen Anschlusses an die nicht CO_2 -spezifische Strahlungsbilanzgleichung (1) bevorzugt gegenüber dem mit GCMs für unveränderte vertikale Temperaturverteilung erhaltenen Wert $S_s^0 = \Delta T_{s,do}^0 = 1.2 K$, der im IPCC-Bericht [2] steht unter Berufung auf [38c] (s. Fußn. 61) und auf [38b], wo 1,2 - 1,3 Grad angegeben wurden. Diese Angabe von 1984 ergibt sich jedoch aus einer Kompensation des kleineren λ (s. Fußn. 62) durch ein größeres Forcing. (Mit dessen älterem Wert aus Fußn. 66 ergeben sich 1,27 gegenüber den 1,07 Grad, die in die aktuelle Gegenüberstellung mit 1984er Wert gehört hätten.) Die populärwissenschaftliche Kommentierung der 1,2 Grad mit einer längeren Tradition [25] oder mit Labormessungen [25a] ist daher irritierend.

⁷⁵Die Wahrscheinlichkeit liegt nach der in Fußn. 1 genannten deutschen Zusammenfassung zur SPM [2] über 90%. - Mit den nach Fußn. 74 für CO_2 bevorzugten 1,2 statt unseren 1,0 Grad wären die Rückkopplungsfaktoren mit $1/1,2 = 0,83$ zu multiplizieren, was im Genauigkeitsrahmen der Abschätzungen unbedeutend, aber schlechter zu begründen wäre.

⁷⁶In [2] werden dazu z. B. im Abschnitt 10.7.2 Nichtlinearitäten in den Rückkopplungen bei AOGCMs diskutiert, und im Abschnitt 10.5.2.2 wird die Sensitivität für gewisse EMICs als *anpassbarer Parameter* betrachtet. - Die Beibehaltung der Forcing-Response-Beziehung (9) als Diskussionsgrundlage ist in solchen Fällen zweckmäßig, aber natürlich nicht zwingend.

⁷⁷In diesem Zusammenhang kann eine Abschätzung zum gegenwärtig wirksamen anthropogenen Treibhauseffekt und zu seinen künftigen Auswirkungen nachgeholt werden. Im Anschluss

Ein grundsätzlicher Unterschied besteht in den Nachwirkungsdauern der Treibhausgas- gegenüber den Abwärme-Emissionen. Deren Forcing würde zusammen mit der Wärmeproduktion verschwinden, während vor allem das CO_2 sehr lange in der Atmosphäre verbleibt. (Vgl. 58 sowie [44A, 44B, 44C, 44D].) Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass die Abwärme unmittelbar wirksam wird, während bei den Berechnungen der atmosphärischen CO_2 -Konzentration aus den Emissionen noch erhebliche Unsicherheiten auftreten (s. SPM in [2]).

CCS und Geo-Engineering / Climate Engineering

Die CO_2 -Entfernung und -Entsorgung beim Einsatz fossiler Brennstoffe wird derzeit unter der Bezeichnung CCS (*Carbon Dioxide Capture and Storage*) [2-2007, 24e] getestet, wobei die Machbarkeit von ähnlichen, älteren Prozessen her erwiesen ist⁷⁸. Unter dem Eindruck von drohenden oder bereits eingetretenen Klimaschäden werden sich zumindest in reichen Ländern auch die erheblichen Kosten aufbringen lassen, mit denen sich der Marktvorteil gegenüber nachhaltigen Energien verringert. Die geologische Speicherkapazität könnte sich jedoch zumindest für Deutschland innerhalb von Jahrzehnten als limitierend erweisen⁷⁹, und die Speicherung am Meeresboden ist problematischer und teurer [24a].

Die Speicherung des CO_2 beim CCS wird von der Geologie (im Unterschied zur verfahrenstechnischen CO_2 -Entfernung) dem *Geo-Engineering* zugeord-

an Gl. (15) wurde das Forcing, das gegenüber dem Beginn der Industrialisierung eingetreten ist, als $F_{res} = 1.6 W/m^2$ angegeben. Mit der zugehörigen Temperatursteigerung von $0.7 K$ führt dies auf ein $\lambda^{eff} = 0.5$ gegenüber $\lambda_e = 0.27 K \cdot m^2/W$ aus der Gl. (6), die keinerlei Rückkopplungen berücksichtigt. Diese können den Unterschied plausibel machen, der bei Berücksichtigung der Nachwirkungen [44a, 44b, 44c] mit Gl. (17) noch größer wird.

⁷⁸Beispielsweise wird die Abtrennung von CO_2 nach der "Kohlevergasung" in der Chemieindustrie seit langem bei der Wasserstoffherzeugung praktiziert und jetzt für den Kraftwerksbetrieb vor der Verbrennung als „pre-combustion-Abscheidung“ erprobt. Zur dauerhaften Speicherung (*Sequestration*) gibt es u. a. Erfahrungen für das bei der Erdgasgewinnung in der Nordsee abgetrennte CO_2 [24].

⁷⁹Dabei ist, besonders bei den Ersatzinvestitionen für die Kernkraft- mit Braunkohlekraftwerken und zuvor mit Tagebauen, zu beachten, dass die Investitionszyklen in der Energiebranche bei 30 und mehr Jahren liegen.

net, zu dem naturgemäß auch nicht klima-relevante Gegenstände des Geo-Ingenieurwesens zählen [24b]. Im IPCC Bericht [2-2007] (WG III) wird CCS demgegenüber nicht unter dem *Geo-Engineering* aufgeführt, das im deutschen Glossar⁸⁰ durch *„technologische Bemühungen zur Stabilisierung des Klimasystems durch direkten Eingriff in den Energiehaushalt der Erde ...“* gekennzeichnet wird. Konkreter, aber unter dem Titel *„Climate Engineering“*, heißt es in der Erläuterung eines Heidelberger Forschungsprojektes [24d]: *„Climate Engineering oder Geoengineering bezeichnet technologische Konzepte zur Manipulation des Klimasystems durch Eingriffe in den globalen Kohlenstoffkreislauf oder die Reduktion der einfallenden Sonnenstrahlung.“*

Während die Bezeichnung *„Geo-Engineering“* auch im Deutschen weite Verbreitung erlangt hat und oft das CCS einschließt, ist das korrektere *„Climate Engineering“* schlecht übersetzbar⁸¹, so dass bei einem richtungsweisen Rundgespräch der Deutschen Forschungsgemeinschaft [24c] vom *„Geo-Engineering im Sinne eines Climate Engineering“* gesprochen wurde. Das Letztere kann CCS besser einbeziehen, was aber eher selten geschieht, obwohl der *Engineering*-Begriff keine Beschränkung auf manipulatorische Konzepte oder Eingriffe beinhaltet. Eine umfassendere Begriffsbildung ist auch unter Ausbildungs-Aspekten sinnvoll.

Von H. GRASSL [25] wird CCS in einem Kapitel *„Geo-engineering - Manipulation bei Halbwissen“* gegenüber anderen Vorschlägen noch am ehesten akzeptiert, vor allem auch, weil dabei kaum internationale Verwicklungen zu befürchten sind und weil die Minderung der CO₂-Emissionen gegenwärtig oberstes Ziel sein muss. Letzteres wird durch gewagte Hoffnungen auf Ersatz für die Minderungsstrategien gefährdet, und internationale Abstimmungsprobleme bei regional unterschiedlicher Interessenlage und *„weitgehender Abwesenheit einer Global Governance“* [24c] wurden bei der Kopenhagener UN-Klimakonferenz 2009 nur zu deutlich.

⁸⁰Dort steht *Geo-Engineering / Geotechnik*. Letztere ist aber eine Übersetzung von *Geotechnical Engineering* (auch im Sinne von *Geo-Ingenieurwesen* aus [24b]).

⁸¹Das *„Klima-Engineering“* betrifft die Raum- Klimatisierung.

Ein viel diskutierter Vorschlag von PAUL CRUTZEN (vgl. Fußn. 2) ist die Kompensation der globalen Erwärmung entsprechend dem „*global cooling*“, wie es (laut Abschnitt 2) unbeabsichtigt in den 1970-er Jahren auftrat, durch gezielten Eintrag von Aerosolen in die Stratosphäre. Weitere Vorschläge betreffen die Ozeane, also regionale und damit noch schwieriger durchsetzbare Maßnahmen. Dennoch wurden Forschungen zur Wolkenerzeugung durch Seewasser-Zerstäubung zusammen mit dem stratosphärischen Aerosol-Eintrag von einem Gremium aus 5 „Top-Ökonomen“, darunter drei Nobelpreisträgern⁸², als *Climate Engineering* mit „*Very Good*“ (1) benotet, während Vorschläge zu Emissions-Besteuerung und -Handel die Einstufungen „*Poor*“ bzw. „*Very Poor*“ (4 bzw. 5 als schlechteste Kategorie) erhielten.

Wie diese kleine Auswahl zeigt, klaffen die Meinungen weit auseinander. Es ist zu befürchten, dass eine kurzreichweitige Ökonomie auch auf diesem Gebiet die Oberhand bekommt, wenn dem nicht auf völkerrechtlicher Grundlage entgegengewirkt werden kann. Im Zusammenhang mit Forschungen zum erwähnten Vorschlag CRUTZENs schreibt zwar H. GRASSL [25], dass es „keine Denkverbote geben sollte“, aber er rechnet nicht mit seiner Realisierbarkeit bzw. Finanzierbarkeit. Bei der DFG-Runde [24c] wurden solche Forschungen nur befürwortet, um eine Art „Notfalltechnologie“ zu prüfen. Sie wäre einzusetzen, wenn CO_2 -Minderungsmaßnahmen gegen die globale Erwärmung nicht ausreichen, oder für den Fall plötzlicher unvorhergesehener Effekte [43b], die den Klimawandel beschleunigen. Dann wäre auch ein internationaler Konsens über ein rasch wirkendes *Climate Engineering* denkbar, dem ansonsten noch weit größere Abstimmungsprobleme als bei den Minderungsstrategien entgegenstehen.

⁸²*Top Economists Recommend Climate Engineering*, von E. BICKEL (Lead Author). *Press Statement* (Washington DC, 4. 9. 2009) des seit 2004 agierenden „*Copenhagen Consensus*“ (<http://fixthecclimate.com>; (nicht zu verwechseln mit dem sogenannten „Minimalkonsens von Kopenhagen“ [24f] und mit [13b].))

Die 2-Grad-Grenze

Die UN-Klimarahmenkonvention [13c] enthält im Artikel 2 als Endziel die *”Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen ... auf einem Niveau ... , auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird.”* Bald nach dem Inkrafttreten 1994 wurde von Deutschland dazu die normative Festlegung einer 2-Grad-Obergrenze vorgeschlagen, die zunächst in der EU und dann im Sommer 2009 auch auf dem G8-Gipfel mit den 16 führenden Wirtschaftsmächten anerkannt wurde. Unter Berufung auf den 4. IPCC-Bericht [2-2007]⁸³ fand sie Eingang in den Kompromiss-Vorschlag von 25 ”Annex-1-Ländern” (Fußn.42) auf der von 191 Staaten besuchten Kopenhagener Konferenz im Dezember 2009 [24f]. Der darin enthaltenen Aufforderung, dem UN-Klimarat die Emissionsziele für 2020 bis Ende Januar 2010 einzureichen, folgten 55 Länder, die 78% der aktuellen Emissionen verursachen [24g]. Diese Selbstverpflichtungen können, ebenso wie der vom Plenum der Konferenz lediglich *”zur Kenntnis genommene”* Kompromiss-Vorschlag, auf dem Weg zu einem ab 2013 wirksamen Post-Kyoto-Abkommen nur den Anfang darstellen.

Zu dessen Vorbereitung wurden beispielsweise in der *Copenhagen Diagnosis* vom November 2009 [13b] drei Szenarien für die Emissionsreduktion durchgerechnet, die für die Einhaltung der 2-Grad-Grenze (mit 67%-iger Wahrscheinlichkeit) erforderlich ist. Danach muss der Emissionspeak spätestens 2020 erreicht werden, und nach Verbrauch eines kumulativen Emissionsbudgets (frühestens um 2040) darf praktisch kein Treibhausgas mehr emittiert werden.

Wegen des bereits heute vorliegenden Temperaturanstiegs um 0,7 Grad gegenüber dem vorindustriellen Wert dürfen künftig nur noch 1,3 Grad hinzukommen (vgl. Fußn. 63), wenn zusammen 2 Grad zugelassen werden. Bei diesem globalen Mittel sind zudem erhebliche, aber unsichere regionale Un-

⁸³ Vom Umweltbundesamt der BRD wurden selbst die niedrigsten CO_2 -Szenarien des IPCC ([2], Tab. TS.2) in Hinsicht auf die 2-Grad-Grenze als unzureichend charakterisiert [43].

terschiede zu beachten. Da die Temperaturanstiege über den Ozeanen geringer sind, liegen sie über dem Festland wegen des globalen Flächenanteils von rund 30 % deutlich höher. Nach SCHELLNHUBER [25b] sind dort (gegenüber den globalen 2 Grad) 3 bis 4, in nördlichen Breiten 5 bis 6 und in arktischen Gebieten bis zu 8 Grad zu erwarten.

Wichtige Auswirkungen können beispielsweise an einem Schema des deutschen Umweltbundesamtes [43a] in Abhängigkeit vom globalen Temperaturanstieg abgelesen werden. Sie lassen verstehen, dass das 2-Grad-Ziel in besonders gefährdeten Ländern als unzureichend angesehen werden muss, was die Verhandlungen z. B. bei den UN-Klimakonferenzen erschwert. Um so wichtiger ist die internationale Unterstützung für diese Länder bei Anpassungsmaßnahmen [43b], die generell zunehmende Bedeutung erlangen und die ebenso wie die Emissionsminderung durch die Klimarahmenkonvention [13c] vorgegeben sind.

Globale Vorräte nicht-nachhaltiger Energien

Nachdem die nachhaltigen Energie-Ressourcen bereits in einem Unterabschnitt zu 3.2 diskutiert wurden, soll hier das Gleiche für die übrigen Energiequellen geschehen, wobei die fossilen Brennstoffe im Rahmen dieses Abschnitts zum anthropogenen Treibhauseffekt das Hauptproblem sind. Reserven als ökonomisch-technisch bereits abbaubare, sichere Vorräte sowie Ressourcen, die auch vermutete und noch nicht ökonomisch-technisch abbaubare Vorräte einbeziehen [14], sind aktuell beispielsweise in [36h] (Tab. 1.1) aufgelistet mit dem Hinweis, dass solche Zahlenangaben *„häufig interessegeleitet“* sind.

Die *„statische Reichweite“*⁸⁴ der fossilen Reserven, die bei konstant fortgeschriebenem Verbrauch resultiert, beträgt etwa 90 Jahre. Derzeit realistischer und kürzer wären *„dynamischen Reichweiten“* [14], die bei exponentiellem

⁸⁴So lautet die Überschrift 9.1.1 in [36h], wo der problematische Aussagewert dieser Angaben hervorgehoben wird.

Verbrauchswachstum mit unterschiedlichen Szenarien resultieren. DÖPEL [3] gab vor dem Hintergrund der damaligen, hohen Wachstumsraten an, dass die fossilen Vorräte *”zwischen den Jahren 2100 und 2200 zu Ende gehen”*. Für Erdöl und auch für Erdgas ist das bereits eher zu erwarten, während die Kohle möglicherweise erst nach diesem Zeitraum aufgebraucht sein wird⁸⁵.

Für Kernbrennstoffe (Abschnitt 4.1) liegen die energetischen Reserven unter bzw. die Ressourcen zwischen denjenigen von Öl und Gas [24b]. Durch die dabei nicht berücksichtigte, weil mit zusätzlichen Gefahren verbundene Wiederaufarbeitung, besonders im Zusammenhang mit der Brütertechnik, können die Vorräte um mehr als eine Größenordnung gestreckt werden⁸⁶, so dass sie in die Größenordnung der Kohleenergie-Ressourcen kommen. Dadurch kann die bei den fossilen Vorräten genannte Frist, um wieder mit DÖPEL zu sprechen, *”um etwa ein Jahrhundert verlängert werden”* [3].

Die Tiefenförderung von Erdwärme (Fußn. 55), die räumlich begrenzt ist, kann praktisch beliebig lange erfolgen. Letzteres gilt bei auch Realisierung der Kernfusionstechnik (s. Abschnitt 4.1), für die kaum eine Beschränkung der Rohstoffbasis existiert. Auch ohne *”solche Spekulationen”* gilt DÖPELS Feststellung vom Ende seiner Einleitung:

”Von Seiten der bereits verfügbaren Energievorräte ergibt sich für mehrere

⁸⁵Interessante Modellrechnungen erfolgten zum extremen Szenario einer Verbrennung sämtlicher fossilen Ressourcen bis zum Jahr 2300 [44d]. Sie hätte ohne Gegenmaßnahmen einen (etwa im Jahr 3000) maximalen Anstieg der globalen Temperatur um nahezu 8 Grad zur Folge. Dabei wurde mit einer kumulierten Emission von $2 \cdot 10^{19} \text{ g CO}_2$ nach Daten aus den 1990-er Jahren gerechnet. Mit den aktuellen Ressourcen aus [36h] und den CO_2 - Äquivalenten der Energie aus Erdöl, Erdgas und Kohle, die in [2-2007] (WG III, Tab. 4.2) angegeben sind, resultieren demgegenüber $4 \cdot 10^{19} \text{ g CO}_2$. Würde die entsprechende, kumulierte Energie von $1,6 \cdot 10^{20} \text{ Wh}$ während eines (nach angenommener ”Null-Emission” von CO_2 beginnenden) Zeitraums von 100 Jahren, der als Untergrenze angenommen sei, gleichmäßig freigesetzt, so entspräche dem ein Forcing von $F_w = 0,36 \text{ W/m}^2$. Mit Gl. (16a) ergibt das ein abwärmebedingtes $\Delta T_s = 0,3 \text{ K}$ als zugehörige Obergrenze. Dies würde sich dem emissionsbedingten ΔT_s überlagern, das derzeit 0,7 Grad beträgt, wobei die 2-Grad-Grenze in der Summe, einschließlich der Auswirkungen anderer nicht-nachhaltiger Energien, letztlich nicht überschritten werden soll.

⁸⁶Siehe [2-2007], WG III, Tab. 4.2 sowie zu neuerdings vorgesehenen Brutreaktoren: Fußn. 93 im Abschn. 4.1.

hundert Jahre keine Schranke für die gegenwärtig sich vollziehende Steigerung des industriellen Energieverbrauchs."

Zur Wettervorhersage

Zu dem oben unter der Zwischenüberschrift "*Über Klimamodelle*" Gesagten folgt hier noch eine ergänzende Gegenüberstellung der Wettervorhersage mit Prognosen des Klimas (als einem Langzeitmittel des Wetters), die beide dasselbe physikalische Gleichungssystem benutzen. Nach dem berühmten Mathematiker JOHN VON NEUMANN (1903-1957) bietet die Vorhersage des Wetters - nach derjenigen des menschlichen Verhaltens - das zweitschwierigste Vorhersageproblem [9]. 1963 leitete der Meteorologe E. W. LORENZ mit seinem einfachen Gleichungssystem eines chaotischen Wettermodells eine stürmische Entwicklung der Wissenschaft vom Chaos ein (s. z. B. [7, 14]), die auch für die atmosphärische Dynamik maßgebend ist und die bekannten, grundsätzlichen Grenzen für die Wettervorhersage aufzeigt.

Solche Grenzen gelten jedoch - entgegen immer noch wiederholten Auffassungen - für die Klimaprognose keineswegs. Als eine treffende Analogie aus der menschlichen Sphäre wird in [2] (FAQ 1.2) die Schwierigkeit der exakten Vorhersage des Sterbealters eines bestimmten Mannes der recht genauen Angebarkeit seiner mittleren Lebenserwartung (derzeit 76 Jahre in einem Industrieland als Szenarium) gegenübergestellt.

Allerdings hängen die Emissionsszenarien, die den zu einer Klimaprognose gebündelten Klimaszenarien zugrunde liegen, vom Menschen ab. Damit wird letztlich die für sein Verhalten bestehende Vorhersageproblematik nach V. NEUMANN wirksam, die zur Hauptsache ein Gegenstand nicht-naturwissenschaftlicher Disziplinen ist (s. Abschnitt 4.2). Im menschlichen Einfluss auf das globale Klima liegen einerseits wesentliche Unterschiede zum (höchstens regional beeinflussbaren) Wetter. Andererseits führt dieser Einfluss unter dem Prognose-Aspekt zu Gemeinsamkeiten mit den nahezu ebenso schwer vorhersagbaren Wetterphänomenen.

Einfache Simulationsmöglichkeiten zur Klimaproblematik

Der Abschnitt wird beendet mit Hinweisen auf weiterführende Möglichkeiten der systemdynamischen Simulation für Leser mit Computer-Ambitionen. Am bequemsten sind die vom US-amerikanischen *Sustainable Institute*⁸⁷ online bereitgestellten, interaktiven Simulatoren zur zeitabhängigen Emission von Treibhausgasen und den daraus resultierenden Konzentrationen, zu den regionalen und zugehörigen globalen Emissionen mit variablen Zielvorgaben u. a. m. (siehe Fußn. 87).

Vertiefende Betrachtungen mit zahlreichen Programmen, die sich auch auf das weitere Umfeld der Klimaproblematik (wie z. B. auf die Bevölkerungsentwicklung und die LORENZsche Chaos-Dynamik) erstrecken, sind in einem breit angelegten Lehrwerk von HARTMUT BOSSEL [46] enthalten, das sich „auch als Handbuch für eigenständige Projektarbeit in Schule, Hochschule oder Forschung“ eignet (laut Vorwort). Zum engeren Problemkreis unseres Abschnitts 3.4 gehören Simulationsmodelle wie „Globaler Kohlenstoffkreislauf“ (Z 302) und mehrere darauf folgende Modelle zur Kohlendioxid-Problematik im „Systemzoo 2“. Weitere globale Probleme werden im „Systemzoo 3“ behandelt, u. a. basierend auf dem bekannten „Weltmodell“ *WORLD 3* [12a]. Es geht dabei um Modelle, die zwar nicht so einfach wie das DÖPELSche sind, aber weit besser durchschaut und variiert werden können als die praktisch nur für Experten zugänglichen, großen Forschungs-Modelle.

⁸⁷ Als *non-profit Organization* gegründet von der führenden Systemdynamikerin DONELLA MEADOWS (1941-2001), Mitautorin von Berichten an den *Club of Rome* [11, 12a]: <http://www.sustainer.org>. Von dort aus gelangt man zu einigen und direkt mit <http://climateinteractive.org/simulations> zu zahlreichen weiteren Programmen.

4 Schlussbetrachtungen

4.1 Kernenergie?

Aussagen über die Ressourcen für Kernenergie und ihre zeitliche Reichweite, die im unmittelbaren Zusammenhang mit den Modellszenarien bedeutungsvoll sind, wurden im vorigen Abschnitt unter der Zwischenüberschrift *Globale Vorräte nicht-nachhaltiger Energien* gemacht. Hier werden die Kerntechniken und ihr Umfeld näher besprochen.

Kernfusion

Mit der Fusionsforschung wird seit langen auf die Erschließung einer praktisch unerschöpflichen Quelle hingearbeitet. Dem 2007 in Kraft getretenen Vertrag zum gemeinsam finanzierten Experimentalreaktor ITER sind neben den kontinental-europäischen EURATOM-Staaten die USA, Japan, Südkorea, Russland sowie China und Indien als die beiden volkreichsten Schwellenländer beigetreten. Das ursprünglich als Abkürzung gemeinte ITER⁸⁸ wird nun als das lateinische *iter*, „*der Weg*“, interpretiert. Er hat eine längere Vorgeschichte.

ROBERT DÖPEL „*war einer der ersten, der sich intensiv mit dem Gedanken der Kernverschmelzung beschäftigte und in dieser Richtung auch Versuche machte*“ [32], und zwar noch vor seinen Leipziger Arbeiten zur Kernspaltung [4-C]. In der Einleitung zu [3] konstatierte er, dass die Verfügbarkeit der herkömmlichen Energiequellen (einschließlich der Kernspaltungsmaterialien) die industrielle Energieproduktion in einigen Jahrhunderten beschränken könnte, während Fusionsmaterialien weitaus länger verfügbar sind.

Das bis heute für die Fusion wichtigste Prinzip mit der russischen Abkürzung TOKAMAK, das auch dem hoffnungsträchtigen ITER zugrunde liegt,

⁸⁸International Thermonuclear Experimental Reactor: <http://www.iter.org/default.aspx>.

wurde 1952 von I. J. TAMM zusammen mit A. SACHAROW, dem nachmaligen Menschenrechtler und Friedensnobelpreistäger (1975), kreiert. Dieser war zugleich am sowjetischen Nachbau der amerikanischen Wasserstoffbombe beteiligt, die auf demselben physikalischen Vorgang basiert und zu deren Zündung die Kernspaltungsbombe diene. Ohne derartige Zündung, d. h. im künftigen Fusionsreaktor, besteht kein Sicherheitsrisiko, das einer Kernschmelze im Spaltungsreaktor vergleichbar wäre, wie sie in Tschernobyl eintrat⁸⁹.

Eine Stromerzeugung im Fusionskraftwerk wird, wenn die noch ausstehenden Tests erfolgreich verlaufen, ab Mitte unseres Jahrhunderts erwartet ([49]; [2-2007] WG III Tab. 4.2). Da die Reaktorentwicklung nur weitgehend empirisch und schrittweise mit immer größeren Anlagen vorangetrieben werden kann⁹⁰, werden dazu weltweit jährlich $10^9 - 10^{10}$ Euro verbraucht. Dabei ist der internationale Konsens und auch das Zusammenwirken, wie der ITER-Vertrag belegt, sehr ausgeprägt. Dies ist umso bemerkenswerter, als Derartiges bei der solarthermischen Kraftwerkstechnik, die noch stärker auf internationale Zusammenarbeit angewiesen ist, weit später und in geringerem Ausmaß eintrat (s. Fußn. 53). Auch mangelt es hierfür nach wie vor an finanziellen Vorleistungen, die bei weitem nicht so hoch sein müssten wie bei der auf die genannten Summen angewiesenen Fusion. ([49, 50]).

Sollte der Strompreis schließlich ähnlich niedrig werden wie bei der Kernspaltung [24], so wären wieder deutlich höhere Wachstumsraten denkbar, als sie bis 2050 zu Gl. (10) genannt wurden. Bereits für ein mittleres $q = 1.05$,

⁸⁹Die wahrscheinliche Ursache der Tschernobyl-Katastrophe von 1986 hat MICHAEL GORBATSCHOW, der im Jahr zuvor an die KP-Spitze gelangt war, im Anhang zu seinem 2003 erschienenen Umwelt-Buch [47] wiedergegeben. Danach wurde die Kernschmelze durch eigenmächtiges Experimentieren des wissensdurstigen Kraftwerksdirektors für eine kerntechnische Abhandlung ausgelöst und nicht, wie oft vermutet, durch das „von oben“ angeordnete Nachholen einer früher versäumten Sicherheitsprüfung. - Im Zusammenhang mit der sowjetischen Kerntechnik sei erwähnt, dass ein späterer Mitstreiter GORBATSCHOWS bei der *Perestroika*, der international bedeutende Schriftsteller DANIIL GRANIN [48], 1973 wegen eines Filmprojekts über die friedliche Nutzung der Atomspaltung ROBERT DÖPEL in Ilmenau aufgesucht hat.

⁹⁰Eine zeitsparende Vorausberechnung wird vor allem durch Turbulenzen mit chaotischen Instabilitäten der Plasmen erschwert, in denen die Fusion erfolgt.

also immer noch geringeres Wachstum als zur Zeit der Prognose DÖPELS, würde nach Abb. 2c (Abschnitt 3.2) bereits gegen Ende unseres Jahrhunderts die Abwärme für die globale Temperatur merklich.

Dann könnten Fusionsreaktoren die gleiche Rolle bei der globalen Erwärmung spielen wie derzeit die fossilen Kraftwerke. Grundsätzlich gilt, dass die Fusion zwar zur Überbrückung bei der CO_2 -Vermeidung erstrebenswert ist, dass aber dann die Wachstumsgrenzen um so mehr beachtet werden müssen, die im Anschluss an Gl. (11) diskutiert wurden. Es zeigt sich hier ein weiteres Mal, dass die nächsten Jahrhunderte im Interesse der viel beschworenen Nachhaltigkeit mehr Aufmerksamkeit verdienen.

Trotz ihrer nahezu unerschöpflichen Rohstoffbasis ist die Fusion nicht nur wegen der radioaktiven Abfälle⁹¹, sondern auch wegen ihrer Abwärme-Emission keine nachhaltige Technik, als die sie jedoch in der Öffentlichkeit und auch in der Fachwelt weithin gilt. Als die bessere Alternative wurde sie sogar von derjenigen Bundesregierung, die eine vorzeitige Abschaltung der Kernspaltungskraftwerke beschloss, ebenso wie zuvor und danach mit sehr hohen, für die Realisierung sicherlich notwendigen Summen gefördert. Sie liegen in der gleichen Größenordnung wie für alle nachhaltigen Energietechniken zusammen [50a]⁹². Diese tragen aber im Unterschied zur Fusion bereits jetzt, wenngleich noch viel zu wenig, zur Minderung der aktuellen CO_2 -Probleme bei.

⁹¹ Sowohl die Mengen an radioaktivem Inventar im Fusionsreaktor als auch an Abfällen, die vor allem durch Aktivierung seiner Innenwände entstehen und regelmäßig entsorgt werden müssen, sind denjenigen eines Spaltungsreaktors der gleichen Leistung vergleichbar. Dessen Abfälle haben allerdings höhere Radiotoxizitäten und Abklingzeiten. Der Anteil der Fusionsabfälle, die in ein geologisches Endlager verbracht werden müssen, wird auf einige wenige bis zu 30 oder mehr Prozent geschätzt. - Diese Angaben entstammen einem Sachstandsbericht von 2002 für den Deutschen Bundestag, der dort nach wie vor als Diskussionsgrundlage dient [50a].

⁹² Wegen der unterschiedlichen nationalen und internationalen Förderinstrumente sind die Summen im globalen Maßstab schwer vergleichbar. Für alle nicht nachhaltigen Energien zusammen überwiegt die Förderung in der EU und in den USA die nachhaltigen erheblich: www.ren21.net/globalstatusreport/g2005.asp.

Kernspaltung

Wegen der in Deutschland besonderen Risikowahrnehmung [14] für die Kernspaltungstechnik wird der Rest dieses Abschnitts dieser Problematik gewidmet. Eine in der Welt einmalige, vorzeitige Abschaltung der CO_2 -freien Kernkraftwerke hätte angesichts der globalen Erwärmung kaum Chancen auf eine Vorbildwirkung (im Sinne des Zitats vom Ende des Abschnitts 2). Dazu wäre z. B. die Gefährdung vieler Menschen in den Marschniederungen und Küstenstädten armer Länder durch den Meeresspiegelanstieg abzuwägen gegen besondere deutsche Befindlichkeiten, die durch große Angst und Besorgnis mitbestimmt sind. Nach der DPG-Studie von 2005 [24] sollten vor allem die deutschen CO_2 -Minderungsziele („minus 40% bis 2020“) nicht gefährdet werden. Die auf den Zeitraum bis 2020 begrenzte Studie stellt die Aufhebung der Laufzeitbefristungen für Kernkraftwerke, die deutlich unter deren technischen Lebensdauer liegen, als zweite Hauptforderung neben die Solarthermie (Abschnitt 3.2).

Dabei macht sie bewusst keine Aussage für oder gegen neue deutsche KKWs, die den Konsens in der Physikalischen Gesellschaft angesichts einer „*überkritischen Öffentlichkeit*“ [24] wohl gefährdet hätte. Im übrigen wird ein deutsches Stromdefizit mit durch Import aus (evtl. zusätzlich gebauten) KKWs der Nachbarländer gedeckt werden, so dass sich in Europa insgesamt bei der Kernkraft wenig ändert [51]. Allerdings spricht gegen eine generelle Aufhebung der Laufzeitbefristungen, dass die Gefahr einer Kernschmelze weit weniger wegen technischem oder menschlichem Versagen als wegen der Möglichkeit terroristischer Aktionen [52] zu fürchten ist. Insofern erscheint die Ablehnung eines Beschlussentwurfs zur Abschaltung der wenigen, nicht hinreichend gegen einen Flugzeugabsturz geschützten Kernkraftwerke durch den zuständigen Bundestagsausschuss (2008) als inkonsequent.

Die Kernschmelze ist im *Kugelhautenreaktor*, einem Hochtemperaturreaktor mit kugelförmigen Brennelementen, praktisch ausgeschlossen. Er wurde in Deutschland entwickelt und in zwei Varianten bis 1988 betrieben [53]. Unter

Beteiligung deutscher Firmen wird er im Ausland weiterentwickelt, und die chinesische Regierung verkündete 2003, bis 2020 dreißig solcher Reaktoren bauen zu lassen. Auch in den USA stehen aufgrund der staatlichen Kreditzusage für neue Kernkraftwerke Entscheidungen über diesen Reaktortyp an⁹³. Man hat vom Kugelhaufenreaktor als einer in der BRD „verpassten Chance“ für die Energieerzeugung gesprochen [53], obwohl die Gefahren des Austretens radioaktiver Materie bestehen bleiben. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass seine Brennelemente kaum zum Atomwaffenbau geeignet sind [56a].

Die Gefahr der Weiterverbreitung von Kernwaffen lässt z. B. das IPCC (in [2-2007], WG III, Abschnitt 4.3.2.3) eine sehr zurückhaltende Position zum Ausbau der Kernspaltungstechnik einnehmen. Gegen deren Neubeginn in Deutschland wird auch und vor allem auf diese Gefahr hingewiesen⁹⁴

4.2 Der Klimawandel und die „andere Kultur“

In einem klimapolitischen Statement des energietechnologischen EU-Beraters GERD EISENBEISS [36], der früher dem Großforschungszentrum Jülich vorstand, finden sich harte Worte gegen den Lebensstil und Energieverbrauch der „privilegierten Milliarde der Industrieländer“. Werbung für Konsum müsse „wohl unterbunden werden“, und es sei eine neue Freizeitkultur zu entwickeln. Noch deutlicher hat bereits ROBERT DÖPEL radikale Einschränkungen des (Energie-) Konsums gefordert. In seiner typischen Art, an die man sich

⁹³Siehe Physik Journal 9 (2010) H.4, S. 12f. - Auch eine Reihe weiterer Länder will die Kernspaltungstechnik ausbauen. Das russische Parlament hat im Januar 2010 ein Milliarden-Projekt für „Schnelle Brüter“ (s. Fußn. 86) beschlossen. Sie „erbrüten“ aus gewöhnlichem (nicht angereichertem) Uran mit schnellen, d. h. ungebremsten Neutronen spaltbares, auch waffenfähiges Plutonium und sind weit gefährlicher als die bisher kommerziell eingesetzten Reaktortypen [53a].

⁹⁴Bei der Aporie mit Teufel und Beelzebub, von denen z. B. in der Diskussion zur DPG-Studie [24] seitens des deutschen Umweltbundesamtes die Rede war, muss das CO₂ als der eine von beiden im Verlauf einer Übergangsphase unter Mitwirkung des anderen, also der Kernspaltung, weitgehend ausgeschaltet werden. Am Ende darf dieser natürlich ebenso wenig triumphieren wie bei der Wette mit dem Herrgott im „Faust“.

gern erinnert⁹⁵, schrieb er in diesem Zusammenhang [3]:

„Wer aber meint, dass darunter auch die weitere Entwicklung aller Kultur zu leiden habe, der sollte sich doch mal fragen, wie viele Kilowattstunden nötig waren, um z. B. die Kultur der Zeit von Beethoven und Goethe zu schaffen!“

Die Zwei Kulturen

„Die Kultur“ war damals in der östlichen Hemisphäre immer noch gegeben durch die Künste und die zugehörigen Wissenschaften⁹⁶. Im Westen spricht man demgegenüber seit 1959 mit dem Physiker und Romancier CHARLES PERCY SNOW von (mindestens) zwei Kulturen, die sich um die Natur- und um die Geisteswissenschaften gruppieren⁹⁷ und deren trennende Kluft vermindert werden soll.

Diese keineswegs verschwundene, aber heute weitgehend verdrängte Kluft entstand nach der Zeit von BEETHOVEN und von GOETHE, der als Dichter mit seinen umfassenden naturwissenschaftlich-technischen Kenntnissen und Ambitionen als einer der Letzten die Einheit der Kultur verkörperte. Daran anknüpfend, leistete in Deutschland seitens der Naturwissenschaft besonders der von ROBERT DÖPEL auch als Philosoph hoch geschätzte WERNER HEISENBERG⁹⁸ *„einen wichtigen Beitrag ... zur Überwindung der Kluft zwischen*

⁹⁵Treffend und ausführlich hat diese Art und den menschlichen Reichtum DÖPELS, besonders auch in Hinsicht auf die „andere Kultur“, J. KLEIN als sein ehemaliger Ilmenauer Doktorand beschrieben [54]. Schon in jungen Jahren liebte DÖPEL philosophische Gedankengänge, wie der Freund HANLE [32] in seinen Memoiren aus der gemeinsamen Göttinger Assistentenzeit berichtet: *„Er war nicht nur ein guter Physiker, sondern auch ein großer Philosoph vor dem Herrn.“* Auch von einer anschließenden Arbeitsstelle in Planegg aus setzte er seine Philosophiestudien im nahen München fort.

⁹⁶In Ostdeutschland gab es vielerorts die „Kulturwissenschaften“, die teilweise versuchten, sich gegenüber den ideologisch noch stärker überfrachteten Gesellschaftswissenschaften zu profilieren. Der herkömmliche Begriff „Geisteswissenschaften“ wurde dort, ebenfalls aus ideologischen Gründen, vermieden.

⁹⁷Bei der ersten Gruppe könnte man von den MINT-Fächern (Fußn. 6) sprechen, aus deren Sicht die übrigen Fächer zusammen mit Kunst und Literatur zur „anderen“, der geisteswissenschaftlichen Kultur gehören. Selbst bei dieser schlichten Darstellung ist klar, dass die Mathematik ebenso wenig eine Naturwissenschaft ist, wie die Sozialwissenschaft zu den Geisteswissenschaften gehört. Diese wird manchmal als eine besondere, dritte Kultur gezählt.

⁹⁸Er gehörte in der Zeit des Eisernen Vorhangs dem Vorstand der gesamtdeutschen Goethe-

Natur- und Geisteswissenschaften - ein Ziel, das Goethe sicher vorschwebte." So endet eine Abhandlung des Physikers und Wissenschaftshistorikers RECHENBERG [55].

Die Kluft und die Klimakrise

Nach C. P. SNOW ist der Verlust der Kommunikation zwischen den beiden Kulturen eines der Haupthindernisse, die kritischen Probleme dieser Welt zu lösen. Für AL GORE stellt die seither keineswegs kleiner gewordene Kluft ein Hauptproblem „*beim Nachdenken über die Klimakrise*“ dar [1], und in einer vertiefenden Darstellung [56] hat er u. a. die Beratungsresistenz von Entscheidungsträgern untersucht.

Der tschechische Staatspräsident VÁCLAV KLAUS sieht in seinem kontroversen Buch [57] die Freiheit durch den „*Klimaaktionismus*“ mit Gefahr einer ökosozialistischen Diktatur bedroht. Der Anhang enthält für ein Hearing des US-Kongresses seine konträren Thesen zu denjenigen von AL GORE sowie seine Rede auf der UN-Konferenz zum Klimawandel 2007, die sich gegen dessen wissenschaftliche Begründungen richtete. Laut Vorwort ist die globale Erwärmung „*mehr eine Angelegenheit der Gesellschaftswissenschaften als eine der Naturwissenschaften*“⁹⁹.

Ähnliches steht im Epilog des - weit gründlicheren und ausführlicheren - Buches eines Historikers [58] im Zusammenhang mit problematischen Datierungsmethoden für die Erdgeschichte:

„Nur über die historische Chronistik ist es möglich, die 'exakten' Naturwissenschaften auf die richtige Bahn zu bringen. Geisteswissenschaftler - das

Gesellschaft in Weimar als bundesdeutscher Vertreter an, auch um zur Verminderung der politischen Kluft beizutragen. In diesen Zusammenhang gehört auch der in Fußn. 26 erwähnte Festvortrag zur Hauptversammlung 1967 [30].

⁹⁹Während V. KLAUS nicht nur Klima-, sondern auch Europa-Skeptiker ist, trägt ein im thüringischen Jena beheimateter Verein, gegründet 2007 von einem Gesellschaftswissenschaftler, den anspruchsvollen Namen „*Europäisches Institut für Klima und Energie e.V.*“ (<http://www.eike-klima-energie.eu>). Unter dem Motto „*Nicht das Klima ist bedroht, sondern die Freiheit*“ führt er Natur-, Geistes- und Wirtschaftswissenschaftler sowie weitere Klimaskzeptiker zusammen und propagiert einschlägige Materialien, wie z. B. [57] und [57a].

sei zum Jahr der Geisteswissenschaften gesagt - sind ein solches Ausmaß an Unexaktheit nicht gewöhnt."

Im Text werden „*Schläge gegen das Klimamärchen*“ geführt, und Ozonloch wie auch Waldsterben (vgl. [14]) werden fälschlicherweise als überflüssige „ökologische Ängste“ eingeordnet¹⁰⁰. Prinzipiell ist jedoch für Prognosen von Klimafolgen der Ansatz einer *Kulturgeschichte* - beispielsweise für das Mittelalters mit seinem klimatischen Auf und Ab - wichtig, wenn man Betrachtungen bis zum Ende unseres Jahrtausends anstellt.

Überbrückungsversuche

Den besprochenen Beispielen für "Klimaskepsis" und für die zumindest auf diesem Sektor wachsende Kluft zwischen den beiden Kulturen steht eine universitäre Initiative zu deren Kooperation beim Bekämpfen des Klimawandels gegenüber [59]. Als die Erben der Geistes- treten dabei die Kulturwissenschaften auf¹⁰¹, und zwar nach wie vor in Allianz mit den Sozialwissenschaftler (s. Fußn. 97), die für Klimaprognosen und zur Bewältigung der Klimakrise besonders wichtig sind.

Derartige Initiativen¹⁰² sollten schon aus diesen Gründen mehr öffentliche Aufmerksamkeit und Zuwendung erhalten, wofür nicht zuletzt die Aktivitäten der Naturwissenschaftler gefragt sein werden. Dies gilt besonders auch für Deutschland, wo derartige Bestrebungen eher rückläufig sind¹⁰³. In die-

¹⁰⁰Beide Phänomene werden zusammen mit dem anthropogenen Klimawandel in einem der zahlreichen, weniger gemäßigten Bücher von Klimaskeptikern [57a] als "rote Lügen" bezeichnet. Demgegenüber verweist Fußnote 2 auf die wahre Ozonloch-Historie, und ohne nachhaltige Maßnahmen (vor allem Rauchgas- und Autoabgas-Reinigung sowie Kalk-Düngung) hätte das Waldsterben nicht 2003 durch die Grünen-Ministerin Künast für beendet erklärt werden können.

¹⁰¹Diese an die „*cultural studies*“ angelehnte Bezeichnung (vgl. auch Fußn. 96) wurde nach 1990 deutschlandweit etabliert. Zur Gegenüberstellung mit den Naturwissenschaften darf man sich wohl auf die *Geisteswissenschaften* zurückziehen, die dem Jahr 2007 immerhin noch seinen regierungsoffiziellen Wissenschafts-Namen gaben.

¹⁰²Hierher gehört auch das im Abschnitt 3.4 zum *Climate Engineering* erwähnte Projekt [24d], das diesen speziellen Fragenkomplex aus natur-, sozial- und rechtswissenschaftlicher Perspektive untersucht.

¹⁰³Im Zuge der Reformierung und Reduzierung der Geisteswissenschaften wurden auch die

sem Zusammenhang ist das 50-jährige Jubiläum des SNOW-Vortrags „*The Two Cultures and the Scientific Revolution*“ im Jahr 2009 zu erwähnen, das vor allem in den angelsächsischen Ländern mit aktuellem Bezug begangen, hierzulande aber kaum beachtet wurde.

Weiteres zu Kultur und Ethik

Abschließend sollen die Gedanken vom Anfang des laufenden Abschnitts nochmals aufgegriffen werden. Ganz im Sinne der beiden Artikel, aus denen dort zitiert wurde, hat der studierte Volkswirt und promovierte Politikwissenschaftler KLAUS TÖPFER in seiner „*Weimarer Rede*“ vom April 2008 [61]¹⁰⁴ eine „*erhebliche Veränderung unseres Verbraucherverhaltens*“ vorhergesagt und eine stärkere „*Rückbindung in Kultur*“ angemahnt. Zu globaler Solidarität und Umweltethik verwies er auf das „*Welt-Ethos*“ des Theologen und Philosophen HANS KÜNG [62].

Angesichts der Auswirkungen entgrenzter Finanzströme sah er „*ungezügelt globale, dramatische Folgen für die wirtschaftliche Stabilität und die Lebensbedingungen*“, und die seither eingetretene Entwicklung [63] unterstreicht seine Forderung nach einer Überprüfung seitens der UN, „*inwiefern leistungsfähige Frühwarnsysteme drohender Katastrophen deren Vermeidung möglich werden lassen*“. Er hob aber auch „*die großen Chancen für Wissenschaft und Forschung, für wirtschaftliche Anwendungen und Exporterfolge*“ und damit für den Arbeitsmarkt hervor, die sich bei richtiger Reaktion auf den Klimawandel besonders für Deutschland auftun.

Des weiteren betonte er die gegenwärtige „*Renaissance des Regionalen*“ sowie deren Bedeutung und Notwendigkeit für die kulturelle Identität. In

Lehrstühle für Geschichte der Naturwissenschaft (und verwandter Gebiete) an den universitären Fakultäten des vereinigten Deutschlands weiter vermindert. Diese „*geborene Klammer zwischen den beiden Bereichen Natur- und Geisteswissenschaften*“, wie sie ein Rektor aus Ostdeutschland nannte [60], war dort bereits um 1970 einer Hochschulreform teilweise zum Opfer gefallen.

¹⁰⁴Die Laudatio des Intendanten, die vor TÖPFERS Rede im Nationaltheater abgedruckt ist, nennt dessen weltweite Aktivitäten. Die Laudatio zu und die Rede von GABRIELE KRONE-SCHMALZ, aus der im Vorspann dieser Arbeit zitiert wurde, sind im gleichen Band zu finden.

diesem Sinne ist für die Universität und die Region Ilmenau auf die vergleichsweise wenig genutzten Möglichkeiten zu verweisen, an das Wirken von ROBERT DÖPEL dauerhaft zu erinnern¹⁰⁵, der hier als der - zumindest auf physikalisch-technischem Gebiet - bedeutendste Wissenschaftler seine letzten 25 Lebensjahre verbrachte¹⁰⁶. Seine Lebensleistung und sein Ethos sind noch höher zu bewerten, wenn man die gesellschaftspolitischen Umstände mit Krieg (bei schwerer Verwundung 1918) und Kriegsgefahr berücksichtigt, unter denen er den größten Teil seines Lebens zubrachte, und sie denjenigen der Gegenwart mit ihren reichen Möglichkeiten gegenüberstellt.

In dieser Gegenwart plädiert KLAUS TÖPFER dafür, „*offen zu sein für die buntere, die vielfältigere Gesellschaft in der globalisierten Welt*“ und die Zukunft „*wo immer möglich aktiv mitzugestalten*“. Oder mit KARLHEINZ BÖHM, einem anderen großen internationalen Akteur [64]:

„*Wichtig ist, dass man etwas tut. Und die Welt nicht so akzeptiert, wie sie ist.*“

¹⁰⁵Zuletzt fand 1995, als sich DÖPELS Geburtstag zum 100. Mal jährte, an der neu gestalteten Grabstätte auf dem Ilmenauer Friedhof eine Gedenkfeier mit der Rektorin DAGMAR SCHIPANSKI und anschließend eine Vortragsveranstaltung an der TU statt. Außer einer aus persönlichem Erleben schöpfenden Ansprache von CHRISTOPH SCHNITTLER als dem *spiritus rector* wurden zwei Vorträge von Leipziger Kollegen gehalten: Der eine von MANFRED HÖTZEL mit dem gleichen Titel wie in [4-E] und der andere von DIETMAR LEHMANN in Anlehnung an [4-C, 27]: „*Der Kernphysiker Robert Döpel*“. - Berichte der *Ilmenauer Uni-Nachrichten* 39/1/96 u. 38/4/95 über die Gedenkveranstaltung und ihre Vorbereitung sind abrufbar unter <http://zs.thulb.uni-jena.de/content/main/journals/iun.xml>.

¹⁰⁶An seinen früheren Doktoranden KLEIN (vgl. Fußn. 95) schrieb er einmal aus Ilmenau: „*Urlaub im eigentlichen Sinne habe ich auch in diesem Jahr nicht gemacht. Wir leben ja hier in einem 'Luftkurort' ...*“.

5 Zusammenfassung

(Eine kurze Zusammenfassung steht unter "Beschreibungen" im DBT-Aufrufportal des Gesamtdokumentes. - Auf eine 7-seitige englische Darstellung, die vor allem die aktualisierten Ergebnisse des DÖPEL-Modells den IPCC-Rechnungen von 2007 gegenüberstellt, wurde bereits in Fußn. 5 verwiesen.)

Zur geschichtlichen Einordnung der Modellbetrachtungen für die globale Erwärmung wird zunächst, mit der Entdeckung des Treibhauseffekts beginnend, ein kurzer Abriss des Diskussionsverlaufs und des Sachstands zum Klimawandel bis heute gegeben. Die graphische Gegenüberstellung der seither beobachteten Temperaturen mit dem Verlauf der atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen zeigt nur andeutungsweise eine Korrelation, wie sie heute für sehr viel längere Zeiträume deutlich geworden ist. Dies macht verständlich, dass ROBERT DÖPEL in seiner **Arbeit zum Abwärme-Einfluss von 1973** die damals widersprüchlich diskutierte, anthropogene Verstärkung des Treibhauseffekts ignoriert hat.

Nahezu gleichzeitig wurden in Berichten an den *Club of Rome* beide Einflüsse als klimatisch wichtig erfasst, wobei die Abwärme **erst spätere Generationen betrifft**. Deren Interessen sind seither selten so missachtet worden wie in der Gegenwart, wo auf ihre Kosten Krisenbewältigung betrieben wird. Dies ist im Jahr der **Zukunft der Energie 2010** ein Anachronismus.

Um einerseits die 1973-er Klima-Arbeit in **DÖPELS Lebenswerk** einzuordnen und andererseits seine herausragende Bedeutung für deren Entstehungsort Ilmenau und dessen Universität zu illustrieren, werden die wichtigsten Phasen seines Wirkens skizziert, beginnend mit der ersten Professur in Leipzig. Dort erzielte er zusammen mit seiner Frau und **mit W. HEISENBERG**, der die theoretischen Grundlagen und Entwürfe bereitstellte, erstmals eine

effektive **Neutronenvermehrung bei der Kernspaltung**, wie sie für deren energetische Nutzung erforderlich ist. Angesichts der umfangreichen, aus der Leipziger Universität veröffentlichten Materialien, die auch die Ilmenauer Zeit betreffen, wurde hier keine biographische Vollständigkeit angestrebt und lediglich Ergänzendes oder auch Korrigierendes gebracht.

Mit seinem **geophysikalischen Modell** von 1973 behandelte DÖPEL den Einfluss der anthropogenen Abwärme auf künftige Temperaturen, vor dem auch in anderen Darstellungen aus dieser Zeit gewarnt wurde. Seither wird dieser Einfluss jedoch weitgehend ignoriert. Im Bericht des UN-Klimarates IPCC von 2007 wird er im globalen Maßstab lediglich als derzeit vernachlässigbar erwähnt, was unausgesprochenermaßen auch auf die Projektionen der Treibhaus-Wirkung **bis zum Ende unseres Jahrtausends** ausgedehnt wurde. Bis dahin erstrecken sich die Modellrechnungen DÖPELS, die für den Fall weiter zunehmender, nicht-nachhaltiger Energieerzeugung zu berücksichtigen wären, wie die Gegenüberstellung der Graphiken zeigt. Deren Basis musste mit einiger Ausführlichkeit dargestellt werden, wobei für den anthropogenen Treibhauseffekt komplexe Sachverhalte stark zu vereinfachen waren. Das gilt besonders auch für die Auswirkung der Rückkopplungseffekte, die im Hinblick auf den Abwärme-Einfluss diskutiert wurde und die weit weniger klar ist als das ursprüngliche DÖPEL-Modell.

DÖPEL geht von der bekannten globalen Strahlungsbilanz mit der STEFAN-BOLTZMANN- und der Solar-Konstanten aus. Der natürliche Treibhauseffekt wird dabei nur implizit berücksichtigt. Für biologisch diskutabile Temperaturerhöhungen von nur einigen Grad ergibt sich ein näherungsweise linearer Zusammenhang mit dem Forcing als einer Triebkraft für die Erwärmung. Mit abgewandelten Proportionalitätskonstanten dienten solche Zusammenhänge auch bei späteren, komplexeren Modellen für die Computersimulation als vereinfachende Interpretationsgrundlage, z. B. in den IPCC-Berichten. Dieser Aspekt, der auf das **Forcing-Konzept** aufbaut, dient als roter Faden für

die quantitative Durchdringung umfangreicher Materialien zur globalen Erwärmung, in denen derartige Grundkonzepte unterschiedlich gehandhabt und oft als bekannt vorausgesetzt werden. Gegenüber dem jüngsten Bericht an den UN-Klimarat musste der Forcing-Begriff, wie auch von anderen Autoren, weiter gefasst werden, so dass die sonst übliche Übersetzung als "Strahlungsantrieb" nicht verwendbar war.

Die **Modellrechnungen** zum anthropogenen Treibhauseffekt aus diesem IPCC-Bericht von 2007 reichen lediglich in den oben erwähnten Beispielen bis zum Jahr 3000, und sie gehen nur in wenigen weiteren Fällen über das Jahr 2100 hinaus. Um diese Zeit ist frühestens eine zusätzliche Temperaturerhöhung durch die Abwärme zu erwarten, wie aktualisierte Modellrechnungen zeigen. Dazu wurde mit DÖPEL exponentielles Wachstum der Erzeugung nicht-regenerativen Energie für unterschiedliche Steigerungskoeffizienten angesetzt. Seit dem Startjahr 1970 für seine Rechnungen betrug die Wachstumsrate 2% pro Jahr, etwa 1/3 des damaligen Wertes. Bei dessen Beibehaltung hätte sich bereits in der Mitte unseres Jahrhunderts ein Mindestbeitrag von 1 Grad zur globalen Temperatur ergeben, und zwar zusätzlich zur Auswirkung des Treibhauseffektes, die bereits demnächst diesen Wert erreicht und auf maximal 2 Grad begrenzt werden soll. Bei 2% Abwärme-Zunahme jährlich würde ein Zusatzbeitrag dieser Größenordnung am Ende des nächsten Jahrhunderts eintreten und bei 0.5% erst gegen Ende unseres Jahrtausends.

Spätestens zu dieser Zeit wären, wenn die 0.5%-Zunahme stattdessen ausschließlich mit Solarenergie erzielt würde, deren Gewinnungsmöglichkeiten bereits am globalen Limit, wie sich aus den von DÖPEL angegebenen **Wachstumsgrenzen** ergibt. Diese werden mit höheren Wachstumsraten entsprechend früher wirksam, beispielsweise bei 2% jährlich in 200 Jahren. Sie wurden auch **für alle nachhaltigen Energien gemeinsam abgeschätzt**. Das vorausgesetzte exponentielle Wachstum kann natürlich kein Dauerzustand sein. Trotz Zunahme der Energieeffizienz, der ebenfalls Grenzen gesetzt sind,

scheint aber eine Zunahme der globalen Energieerzeugung zumindest beim gewünschten Wirtschaftswachstum wegen der Kopplung mit dem Arbeitsmarkt derzeit ohne Alternative zu sein.

Die Modellbetrachtungen zeigen, dass - zwischen dem Zeithorizont von Jahrzehnten für die Treibhausdiskussion und den Forderungen nach Sicherheit radioaktiver Endlager für eine Jahrmillion, die aus radioaktiven Abklingzeiten abgeleitet sind, - dem **Zeithorizont weniger Jahrhunderte** mehr Aufmerksamkeit gebührt. Innerhalb solcher Zeiträume könnte mit einer künftigen Kernfusionstechnik die Wachstumsgrenze für die Globaltemperatur erreicht werden, die durch die Abwärme bedingt ist.

Während der zeitliche Horizont bei den üblichen **Kernenergie-Diskussionen** extrem groß ist, wird der Raumhorizont, z. B. in der BRD im Zusammenhang mit der Abschaltung der KKWs, oft auf das nationale Gebiet beschränkt. Jedoch ist wegen der armen und von den Klimafolgen am ehesten betroffenen Völker, deren Migrationsdruck bereits spürbar ist, ein **globaler Raum- und Verantwortungs-Horizont** angebracht. Natürlich gilt dies auch für die Kernwaffen-Gefahr, die gegen einen Ausbau der Energiegewinnung mit den gegenwärtig genutzten Reaktortypen spricht.

Im Hinblick auf den weiteren Einsatz fossiler Brennstoffe wurde Chancen der **CO₂-Entfernung und -Entsorgung** (CCS) für die Kraftwerkstechnik besprochen und mit beim Geo-Engineering / Climate Engineering eingeordnet, dessen weitere, kontrovers diskutierte Perspektiven ebenfalls kurz behandelt wurden.

Wiederum an Überlegungen DÖPELS anknüpfend und mit kritischer Betrachtung der seither eingetretenen Entwicklung [63], wurden zuletzt **geistig-kulturelle Aspekte** einer Änderung des Lebensstils im Sinne der **Nachhaltigkeit**

erörtert. Störungen im Verhältnis von natur- und geisteswissenschaftlicher Kultur bei klimarelevanten Fragen wurden ebenso benannt wie sozialwissenschaftliche Ansätze zur Problemlösung. Sie müssen ausgebaut werden, damit nicht nur die Zivilisation, sondern auch die zugehörige Kultur vor Rückschlägen bewahrt wird, wie sie schon in der Vergangenheit zu den beschriebenen Defiziten bei der Bekämpfung des Klimawandels geführt haben.

Dessen nachhaltige Eindämmung ist, solange der Energiekonsum überhaupt wächst, weder mit **Fusionskraftwerken** noch mit **nachhaltigen Energiequellen** möglich, so wichtig diese für eine **Übergangszeit** auch sind. Danach darf die globale Energieproduktion nicht mehr gesteigert werden, worauf man sich im Sinne DÖPELS, d. h. im Interesse künftiger Generationen, bereits lange vorher einstellen sollte.

6 Dank

Zuerst ist bereits verstorbener Kollegen zu gedenken. Der befreundete Fachkollege FRIEDRICH KOHLER hat mit mir seit 1960 über die „globalen Probleme“ der Umwelt heiß diskutiert und mich aus Wien mit einschlägigen Schriften, z. B. von den dortigen Pugwash-Konferenzen und besonders auch zu Klima-Fragen, versorgt. In Ilmenau hat - etwa zur gleichen Zeit wie ROBERT DÖPEL - der namhafte Kybernetiker und Systemtechniker KARL REINISCH solche Probleme aufgegriffen. In freundschaftlicher Zusammenarbeit, in der ich den naturwissenschaftlichen Part bestritt, haben wir sie ab dem Ende der 1970er Jahre in die Lehre einbezogen, wobei auch das DÖPEL-Modell zu seinem Recht kam.

Ohne die Unterstützung meiner Frau wäre diese Abhandlung nicht möglich gewesen. Unsere drei Söhne wirkten ebenfalls motivierend, und sie haben aus mathematischer, naturwissenschaftlicher und technischer Sicht Beiträge geliefert. Frau D. BÖHME hat die Textgestaltung und Frau A. CHALL Diskussionen mit Korrekturen beigesteuert. Herr Dr. J. WILKEN vom Ilmenauer Universitätsverlag/ilmedia war ebenfalls sehr hilfreich.

Ihnen allen sage ich auch hier meinen herzlichen Dank.

Ilmenau, am Jahresende 2008.

Literatur

- [1] Gore, A., Paramount 2006, *EINE UNBEQUEME WAHRHEIT - Eine globale Warnung*; auch als DVD. Dazu das Buch *Eine unbequeme Wahrheit*, München 2006, sowie die Internet-Hinweise unter <http://www.climatecrisis.net>
- [2] IPCC: Climate Change. Cambridge 2007. Wenn im Text nichts anderes erwähnt wird, ist der Teil „*Working Group I*“ aus dem 4. Bericht von 2007 (auch unter http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html) gemeint. Ansonsten:
- [2-1990] 1. Bericht mit dem „*Supplementary Report*“ von 1992.
- [2-1994] 2. Bericht (in der Verlagsankündigung: 1995).
- [2-2001] 3. Bericht, auch unter: http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar
- [2-2007] 4. Bericht, auch unter http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm, mit zusätzlichen Materialien gegenüber der gedruckten Version. Deutsche „*Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger*“ (SPMs) mit gemeinsamem Glossar (im Annex) unter http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm#6.
- [3] DÖPEL, R., *Über die geophysikalische Schranke der industriellen Energieerzeugung*. Wiss. Zeitschrift TH Ilmenau 19 (1973) H. 2, S. 37-52. <http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12380>.

- [3a] Döpel, R. u. K., Heisenberg, W., *Der experimentelle Nachweis der effektiven Neutronenvermehrung in einem Kugel-Schichten-System aus D₂O und Uran-Metall* (Original 1942: <http://www.deutsches-museum.de/archiv/archiv-online/Geheimdokumente> unter "Forschungszentrum Leipzig"); mit dem Jahr der Freigabe 1946 versehen in: Heisenberg, W., *Gesammelte Werke Bd. A II* (Hrsg. Blum, W., Dürr, H.-P., Rechenberg, H.), Berlin etc. (1989), S. 536-544.
- [3b] Kleint, C., Wiemers, G., (Herausg.): *Werner Heisenberg im Spiegel seiner Leipziger Schüler und Kollegen*. Leipziger Universitätsverlag 2006.
- [4] Beiträge zur Geschichte von Technik und technischer Bildung (Hrsg. L. Hiersemann); Folge 13. Hochsch. f. Technik, Wirtsch. u. Kultur (FH) Leipzig 1995. DARIN:
- [4-A] Kleint, C., *Leben und Wirken von Robert Döpel - Zum 100. Geburtstag von Robert Döpel*. S. 3-12.
- [4-B] Wadewitz, H. *Krieg und Studium - Erinnerungen an mein 1940 in Leipzig begonnenes Studium und an Robert und Klara Döpel*. S. 13-18. - *Robert Döpel in Briefen aus seiner Ilmenauer Zeit (1960-1982)*. S. 19-32.
- [4-C] Lehmann, D., *Döpels Arbeiten zur Atom- und Kernphysik*. S. 33-63.
- [4-D] Hantzsch, E., *Robert Döpels Arbeiten zur Gasentladungsphysik*. S. 64-73.
- [4-E] Hötzel, M., *Robert Döpel und die Politik*. S. 74-101.
- [4-F] Kleint, C., *Briefe Döpels zwischen 1945 und 1982*. S. 102-153.
- [4-G] Kleint, C., *Bibliographie der wissenschaftlichen Arbeiten von Robert Döpel*. S. 154-165.
- [5] Ludwig, K.-H., *Eine kurze Geschichte des Klimas. Von der Entstehung der Erde bis heute*. München 2006.

- [5a] Jacob, D. J., et al., *Radiative Forcing of Climate Change: Expanding the Concept and Addressing Uncertainties*. The National Academies (USA): Board on Atmospheric Sciences and Climate of the NRC. Washington, D.C. 2005: http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=11175
- [6] Flügge, S. (Hrsg.), Handbuch der Physik XLVIII, Berlin 1957: *Geophysik II*; darin Möller, F., *Strahlung in der unteren Atmosphäre*, S. 155-253.
- [7] Gassmann, F., *Was ist los mit dem Treibhaus Erde?* Zürich, Stuttgart, Leipzig 1993.
- [8] Wisniak, J., *Svante Arrhenius and the Greenhouse Effect*. Indian J. of Chem. Technology 9 (2002) S. 165-173.
- [8a] Arrhenius, S., *Das Werden der Welten*. Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig 1908.
- [9] Hupfer, P., Kuttler, W. (Hrsg.), *WITTERUNG UND KLIMA. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. Stuttgart etc. 2005.
- [10a] <http://hadobs.metoffice.com/hadcru3/diagnostics/global/nh+sh/>; s.a. Brohan, P. et al., *Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850*. J. Geophys. Res. 111 (2006), D12106; doi: 10.1029/2005JD006548.
- [10b] <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.smoothed.yr20> bis 1958, danach <http://scrippsco2.ucsd.edu/> ; s.a. Keeling, C. D., et al., *Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000*. In: Ehleringer, J.R., et al. (eds.), *A History of Atmospheric CO₂ and its effects on Plants, Animals, and Ecosystems*. New York 2005, p. 83-113

- [11] Meadows, D., et al., *Die Grenzen des Wachstums (Bericht an den Club of Rome zur Lage der Menschheit)*, Stuttgart 1972.
- [11a] Holdren, J.P., *Global Thermal Pollution*. In: Holdren, J.P., Ehrlich, P.R., (eds.), *Global Ecology. Readings toward a rational strategy for man*. New York etc. 1971, S. 85-88.
- [11b] Bryson, R.A., *A Reconciliation of several Theories of Climate Change*. In: Wie [11a], S. 78-84.
- [12] Mesarovic, M., Pestel, E., *Menschheit am Wendepunkt. 2. Bericht an den Club of Rome zur Weltlage*. Stuttgart 1974.
- [12a] Meadows, D., et al., DIE NEUEN GRENZEN DES WACHSTUMS. *Die Lage der Menschheit: Bedrohung und Zukunfts-Chancen*. Stuttgart 1992. - Dies.: GRENZEN DES WACHSTUMS: *Das 30-Jahre-Update. Signal zum Kurswechsel*. Stuttgart 2006. - Dazu: Interview von Dennis Meadows mit Susanne Schädlich im Bonner General-Anzeiger v. 4./5.10. 2008, S. 6.
- [13] Hänsel, Ch., *Geophysik und Umwelt*. Leipzig 1975. - *Klima-Änderungen: Erscheinungsformen und Ursachen*. Leipzig 1975.
- [13a] Frank, W., *Das Problem der globalen Energieversorgung*. In: *Die Pugwash-Bewegung – Wissenschaftler für den Frieden* (Hrsg.), Weltprobleme und Wissenschaft, Wien 1976, S. 65-89.
- [13b] Gruppe aus 26 führenden Klimaforschern, *"The Copenhagen Diagnosis 2009"*: <http://www.copenhagendiagnosis.org> mit deutschsprachiger Zusammenfassung. (S. a. Fußn. 1.)
- [13c] United Nations Framework Convention on Climate Change. Deutsch: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/konvger.pdf> ; die letzte Seite zum Anhang fehlt in der deutschen Fassung und ist aus dem englischen *Annex* zu ergänzen. (Diese Bezeichnung wird meist auch im Deutschen, z. B. für die "Annex-1-Länder", bevorzugt.)

- [13d] Bericht vom Kongress *ClimateChange* mit 2000 Forschern aus 80 Ländern in Kopenhagen, März 2009: <http://climatecongress.ku.dk/pdf/synthesisreport>.
- [14] Arnold, H., *Chemisch-dynamische Prozesse in der Umwelt. Eine stoff- und populationsökologische Einführung*. Stuttgart u. Leipzig 1997. Weitgehend unverändert unter <http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=11749> (2008).
- [15] (Anonym) *Ein Kühlschrank feiert Geburtstag*. Glocalist Daily News; Tageszeitung für CSR & Wirtschaftsethik. Hamburg 19.03.08. <http://www.glocalist.com>
- [16] Dameris, M., et al., *Das Ozonloch und seine Ursachen*. Chem. in uns. Zeit 41 (2007) S.152-168.
- [17] Velders, G. J. M., et al., *The Importance of the Montreal Protocol in Protecting Climate*. Proceedings Natl. Acad. Sci. 2007, 104 (12), S.4814-4819. www.rivm.nl/bibliotheek/digitaaldepot/Montreal_Protocol_PNAS_Mar2007.pdf.
- [18] Wernicke, C., *Vom Präsidentschaftskandidaten zum Popstar: AL GORE, der Klima-Rocker*. Süddeutsche Zeitung 18.02.2007.
- [19] Pötter, B., In letzter Minute. Die Zeit (Hamburg) 6. 9. 2007 (Nr. 37), S. 92.
- [20] Weizsäcker, E. U. v., *Klima, Ressourcen und Krieg*. Blätter für deutsche und internationale Politik (Monatszeitschrift) 2008 H. 2, S. 45-54.
- [21] Maxeiner, D., Miersch, M., *LEXIKON DER ÖKO-IRRITÜMER: Überraschende Fakten zu Energie, Gentechnik, Gesundheit, Klima, Ozon, Wald und vielen anderen Umweltthemen*. Frankfurt 1998; Taschenbuch-Sonderausgabe 2002. - Aktualisierte Taschenbuchausgabe mit neuem Untertitel: *Fakten statt Umweltmythen*. München 2001. (Jeweils mit Nachauflagen.)

- [21a] Easterbrook, G. *A Moment on the Earth. The coming age of Environmental Optimism*. New York 1995.
- [22] Hauck, A., *Rechnen fürs Klima*. Physik J. 9 (2010) S. 10.
- [23] Lippold, W., (Kommissions-Vorsitz), *Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung. Zukunft sichern – Jetzt handeln*. 1. Bericht der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“. Bonn 1992.
- [24] Blum, W., Rebhahn, E., *Klimaschutz und Energieversorgung in Deutschland 1990-2020. Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*. Bad Honnef 2005. Broschüre, auch unter <http://www.dpg-physik.de> . Dazu der Diskussionsbericht: Pawlak, E., *Jahrhundertproblem Klima*. Physik Journal 5 (2006) Nr. 4, S. 5f., mit dem Leitartikel (S. 3): *Mehr Sicherheit nach Tschernobyl?*
- [24a] Goerne, G. v., *CO₂-Abscheidung und -Lagerung (CCS) in Deutschland*. www.germanwatch.org/klima/ccsdeu09.htm . Umweltbundesamt. Best.-Nr. 09-2-04 (2009).
- [24b] Deutsches GeoForschungsZentrum, *Geoengineering-Zentren unter* <http://www.gfz-potsdam.de> .
- [24c] Grunwald, A., *Geo-Engineering*. Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis 18 (2009), S. 131-132. www.itas.fzk.de/tatup/092/grun09a.htm
- [24d] Interdisziplinäres Projekt *The Global Governance of Climate Engineering*: <http://www.marsilius-kolleg.uni-heidelberg.de>
- [24e] Metz, B., et al. (Eds.), *Carbon Dioxide Capture and Storage*. IPCC Special Report, Cambridge 2005. www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm

- [24f] 15. UN-Klimakonferenz; Kopenhagen-Vereinbarung vom 18.12.2009:
www.bmu.de/15_klimakonferenz/doc/print/45418.php
- [24g] Presse-Mitteilung des UN-Klimarates (Bonn, 1.2.2010): <http://unfccc.int/press/items/2794.php>.
- [25] Graßl, H., *Was stimmt? KLIMAWANDEL. Die wichtigsten Antworten*. Freiburg etc. 2007.
- [25a] Rahmstorf, S., Schellnhuber, H. J., *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie*. München, 6. Auflage 2007.
- [25b] H. J. Schellnhuber im Gespräch mit K. Schwanke: Ausschnitt aus einer TV-Sendung ("*Lange Nacht des Klimas*") vom 29.10.09:
www.zdf.de/ZDFmediathek/beitrag/video873974/Ist-das-Zwei-Grad-Ziel-noch-zu-schaffen%3F.
- [25c] Seidler, C., *Falsche Gletscherprognose empört Klimaforscher*. SPIEGEL ONLINE v. 19.1.10: www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,518,672852,00.html.
- [26] *Klima-Report*. GEO (Hamburg) 2007 H.12 S. 154-198; mit einem 32-Seiten-Beiheft „*Wer ist der Beste beim Klimaschutz?*“ im Bundesländer-Vergleich.
- [27] Lehmann, D., Kleint, Ch., *Das Leipziger Uranmaschinenprojekt - einer der Bausteine auf dem Wege zur technischen Anwendung der Kernenergie*. Beiträge zur Geschichte von Technik und technischer Bildung (Hrsg. L. Hiersemann); Folge 6, Hochsch. f. Technik, Wirtsch. u. Kultur (FH) Leipzig 1993, S. 3-141.
- [28] Hanle, W., Rechenberg, H., 1982: *Jubiläumsjahr der Kernspaltungsforschung*. Physikalische Blätter 38 (1982) Nr. 12, S. 365-367.

- [29] Hiersemann, L., *Robert Döpel und das Leipziger Uranmaschinenprojekt*. Schriftenreihe „Traditionen der technischen Bildung in Leipzig“, H. 14. Leipzig 1994.
- [29a] Cassidy, D. C., *Werner Heisenberg: Leben und Werk*. Heidelberg etc. 1995. (Originaltitel: *Uncertainty. The Life and Science of Werner Heisenberg*. New York 1992.)
- [29b] Döpel, R. u. K., *Die Unterschreitung der spektralanalytischen Nachweisgrenze von Spurenelementen durch die Untersuchung der in ihnen erregten β -Strahlung*. Physikal. Zeitschr. 44 (1943), S. 261-269.
- [29c] Irving, D. J. C., *The Virus House*. London 1967. Deutsch: *Der Traum von der deutschen Atombombe*. Gütersloh 1967. Im Text unverändertes engl. Paperback: *The German Atomic Bomb: The History of Nuclear Research in Nazi Germany*. New York 1983.
- [29d] Jungk, Robert, *Heller als tausend Sonnen. Das Schicksal der deutschen Atomforscher*. Stuttgart 1956.
- [30] Heisenberg, W., *Das Naturbild Goethes und die technisch-wissenschaftliche Welt*. Gesammelte Werke Bd. A II (Hrsg. Blum, W., Dürr, H.-P., Rechenberg, H.), Berlin etc. (1989), Bd. C II, S. 394-409.
- [31] Personalakte Kad. 0634 *Prof. Dr. phil. habil. Robert Döpel* (2 Teile). Archiv der TU Ilmenau.
- [32] Hanle, W., *Robert Döpel 75 Jahre*. Physikalische Blätter 26 (1970) Nr. 12, S.573. - Ders.: *Nachruf auf Robert Döpel*. Physikalische Blätter 39 (1983) S. 104; - Ders.: *Memoiren*. Giessen 1989. - Ders.: Briefe an C. KLEINT vom 3.8.1984, 16.4.85 u. 29.7.85 in [3b], S. 84ff.
- [33] Klötzli, F. A., *ÖKOSYSTEME. Aufbau, Funktion, Störungen*. Stuttgart 1989.

- [34] IPCC Special Report on Emission Scenarios (SRES). Cambridge 2000 und www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm.
- [35] Weltenergieerat-Deutschland: *Energie für Deutschland. Anforderungen an ein konsistentes energiepolitisches Konzept*. DNK-Veröffentlichungen 2006, <http://www.worldenergy.org/dnk/publikationen/default.asp>
- [36] Special *Klima und Energie* der VDI-Gesellschaft Energietechnik, in: BWK - Das Energie-Fachmagazin 59 (2007) Nr. 10. Dazu die Studie (2008): *Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030* unter <http://www.ewi.uni-koeln.de/gesamtkonzept-2030.156.0.html>.
- [36a] UN, *The 2008 Revision Population Database*: <http://esa.un.org/unpp>
- [36b] UN, *World Population to 2300*: <http://www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf>
- [36c] Birg, H., in: *Bevölkerungsentwicklung*. Informationen zur politischen Bildung, Heft 282 (2004) aus der Bundeszentrale für politische Bildung: <http://www.bpb.de/publikationen/S10WV3,0,Bevoelkerungsentwicklung.html>
- [36d] *Kernaussage des Instituts für Wachstumsstudien* (2008): http://www.wachstumsstudien.de/Inhalt/PDF/IWS_Kernaussage.pdf
- [36e] Bundesamt für Umwelt (Schweiz), *Wachstum und Umweltbelastung: Findet eine Entkoppelung statt?* <http://www.bafu.admin.ch> (2005).

- [36f] Röttgers, N., *Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energie- und Ressourcenverbrauch*. Minister-Rede vom 3.12.09: <http://www.cducsu.de/startseite.aspx>
- [36g] Deutschlands Informationsportal zu Erneuerbaren Energien: <http://www.unendlich-viel-energie.de>.
- [36h] Cramer, B., Andruleit, H. (Koordin.), *Energierohstoffe 2009* (Langfassung). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Ressourcen (Hannover): <http://www.bgr.bund.de>.
- [37] Nick, H., *Sozialismus und Wirtschaftswachstum*. Berlin (Ost) 1977.
- [37a] Petschow, U., et al., *Umweltreport DDR*. Studie des Inst. f. Ökologische Wirtschaftsforschung. Frankfurt/Main 1990.
- [37b] Weck, R. de, *NACH DER KRISE. Gibt es einen anderen Kapitalismus?* München 2009.
- [38] Hansen, J., et al., *Efficacy of climate forcings*. J. Geophys. Res. 110 (2005), S. 1-45.
- [38a] Hansen, J., et al., *Radiative forcing and climate response*. J. of Geophys. Research 102 (1997) D6, S. 6831-6864.
- [38b] Hansen, J., et al., *Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms*. In: Hansen, J., Takahashi, T. (Hrsg.), *Climate Processes and Climate Sensitivity*. Geoph. Monogr., Nat. Acad. of Sci., Washington D.C. 1984, S. 130-164.
- [38c] Bony, S., et al., *How Well Do We Understand and Evaluate Climate Change Feedback Processes? (Review Article)*. J. of Climate 19 (2006), S. 3445-3482.
- [39] Puls, K.-E., *Unser Klima wird im All gemacht - Freispruch für CO₂*. CIVIS: Vierteljahresschrift für eine offene und solidarische Gesellschaft H. 1/2007, S. 8-17.

- [40] MPS-Pressenotiz 8/2004 aus <http://www.mps.mpg.de>.
- [40a] Feulner, G., Rahmstorf, S., *On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth*. Geophys. Res. Lett. 37 (2010), L05707, doi:10.1029/2010GL042710. Dazu die Pressemitteilung des Potsdam Institut für Klimafolgenforschung vom 10.3.2010: *Ruhende Sonne würde globale Erwärmung kaum abschwächen*, unter <http://idw-online.de/pages/de/news359467>.
- [41] Kuttler, W., Zmaršly, E., *Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt - Ursachen und Auswirkungen*. Petermanns Geographische Mitteilungen 144 (2000), S. 6-13.
- [42] Myhre, G., et al., *New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases*. Geophys. Research Letters 25 (1998), S. 2715-2718.
- [43] Kartschall, K., et al., *Klimaänderungen, deren Auswirkungen und was für den Umweltschutz zu tun ist*. Berlin 2007. Als kostenlose Download-Broschüre unter <http://www.uba.de>
- [43a] Knoche, G., et al., *Konzeption des Umweltbundesamtes zur Klimapolitik: Notwendige Weichenstellungen 2009*. Positionspapier unter <http://www.uba.de>.
- [43b] Mäder, C., *Kipp-Punkte im Klimasystem*. Hintergrundpapier des Umweltbundesamtes unter www.uba.de (2008).
- [44] Montoya, M., et al., *The earth system model of intermediate complexity CLIMBER-3&. Part I: Description and performance for present-day conditions*. Climate Dynamics 25 (2005), S. 237-263 u. 26 (2006), S. 327. (Part II zur Veröff. vorgesehen. Wesentliche, den IPCC-Bericht [2] ergänzende Aussagen dazu erfolgten von anderer Seite[44a].)
- [44a] Plattner, G.-K., et al., *Long-Term Commitments Projected with Climate-Carbon Cycle Models*. Journal of Climate 21 (2008), S. 2721-2751.

- [44b] Solomon, S., et al., *Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions*. Proc. Natl. Acad. Sci. 106 (2009), S. 1704-1709. <http://www.pnas.org/content/106/6/1704>
mit <http://www.pnas.org/cgi/content/full/0812721106/DCSupplemental>.
- [44c] Schmittner, A., et al., *Future changes in climate, ocean circulation, ecosystems, and biogeochemical cycling simulated for a business-as-usual CO₂ emission scenario until year 4000 AD*. Global Biogeochemical Cycles 22 (2008), GB1013, doi:10.1029/2007GB002953, S. 1-21.
- [44d] Eby, M., et al., *Lifetime of Anthropogenic Climate Change: Millennial Time Scales of Potential CO₂ and Surface Temperature Perturbations*. Journal of Climate 22 (2009), S. 2501-2511.
- [45] Driesschaert, E., *Climate Change over the Next Millennia Using LOVECLIM, a New Earth System Model Including Polar Ice Sheets*. PhD Thesis, Louvain-la-Neuve, Belgien, 2005. Auch unter <http://edoc.bib.ucl.ac.be:81>.
- [46] Bossel, H., *SYSTEME, DYNAMIK, SIMULATION. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Norderstedt 2004. Dazu *Systemzoo 1: Elementarsysteme, Technik und Physik; 2: Klima, Ökosysteme und Ressourcen; 3: Wirtschaft, Gesellschaft und globale Entwicklung*.
- [47] Gorbatschow, M., *Mein Manifest für die Erde*. Frankfurt/Main 2003.
- [48] Granin, D., *Das Jahrhundert der Angst. Erinnerungen*. Berlin 1999.
- [49] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, *Kernfusion - Stand und Perspektiven*. Garching/Greifswald 2008. Auch unter <http://www.ipp.mpg.de>.
- [50] Keuntje, M., *Asien macht den Weg zur Fusion frei*. Physik Journal 7 (2008) Nr. 8/9, S. 7.

- [50a] Grunwald, A., et al., *Kernfusion*. Bundestags-Büro für Technikfolgenabschätzung, TAB-Arbeitsbericht Nr. 75 (2002): <http://www.tab-beim-bundestag.de> . Dazu die Bundestagsdrucksachen 17/467 und 17/690 vom 20.1. bzw. 10.2.10 unter <http://www.bundestag.de/dokumente/index.jsp> sowie *Die Zukunft der Energie* unter www.bundestag.de , Video-Podcast #03/10 mit PDF-Textversion vom 30.01.10.
- [51] Meller, E., *Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030*. BWK - Das Energie-Fachmagazin 59 (2007) Nr. 10 (Special *Klima und Energie* der VDI-Gesellschaft Energietechnik), S. 10-12.
- [52] Pistner, C., Küppers, C., *Analyse des Bedrohungspotenzials „gezielter Flugzeugabsturz“*. Darmstadt 2007. Auch unter <http://www.oeko.de/publikationen/dok/613.php>.
- [53] Knizia, K., *Der Thorium-Hochtemperaturreaktor THTR 300 - Eine vertane Chance?* Atw: Internat. Journal f. Nuclear Power 47 (2002), S. 110-117.
- [53a] Roedel, T., *Die Renaissance der Kernkraft*. In: Die Rohstoff-Woche, KW 05/2010 v. 29.1.10, unter <http://www.rohstoff-welt.de> .
- [54] Klein, J., *Einige persönliche Erinnerungen an Professor Döpel*. Wiss. Zeitschrift TH Ilmenau 32 (1986) H. 1 S. 29-35.
- [55] Rechenberg, H., *Goethe hat ihn durch sein ganzes Leben begleitet. Werner Heisenbergs Auseinandersetzung mit Goethes Naturbild*. In: Goethe-Jahrbuch, Weimar 2003, S. 277-291. Dazu: Arnold, H., *Zwei Kulturen im Disput über das Goethebild moderner Naturwissenschaftler* <http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=9690> (2007).
- [56] Gore, A., *Angriff auf die Vernunft*. München 2007.

- [56a] Gore, A., *WIR HABEN DIE WAHL. Ein Plan zur Lösung der Klimakrise*. München 2009 (zeitgleich mit der amerikanischen Ausgabe).
- [56b] Schoeller, O., *Eine unbequeme Wahrheit*. Cicero (Magazin für politische Kultur), Berlin, H. 9/2008, S. 28-30. www.cicero.de/1373.php?ausgabe=09/2008.
- [56c] Jacobson, M. Z., DeLucchi, M. A., *Plan für eine emissionsfreie Welt bis 2030*. Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, Dez. 2009, S. 80-87. <http://www.spektrum.de/artikel/1010840&z=798888>
- [57] Klaus, V., *BLAUER PLANET IN GRÜNEN FESSELN. Was ist bedroht: Klima oder Freiheit?* Wien 2007.
- [57a] Mann, T., *ROTE LÜGEN IM GRÜNEN GEWAND. Der kommunistische Hintergrund der Öko-Bewegung*. Rottenburg 2009.
- [58] Behringer, W., *Eine Kulturgeschichte des Klimas. Von der Eiszeit bis zur globalen Erwärmung*. München 2007.
- [59] Leggewie, C., *Kulturelle Revolution*. Forschung & Lehre 2008 H. 8, S. 505.
Dazu : *Soziale Folgen des globalen Klimawandels und kulturelle Voraussetzungen seiner Bewältigung* (2008). <http://www.kulturwissenschaften.de/klimakultur>.
- [60] Berg, G., in: Huber, B. (Hrsg.), *Humboldt neu denken*. Schriften der Hanns-Martin-Schleyer-Stiftung, Nr. 65, Köln 2005, S. 126.
- [61] Töpfer, K., *Umweltpolitik und Klimawandel - Bedrohung und Chancen in einer globalisierten Welt*. In: Leibrock, F. (Hrsg.), *Zukunft andenken. Weimarer Reden*. Weimar 2008. S. 19-38.
- [62] Küng, H., *Projekt Weltethos*. München 2006; s. a. <http://www.weltethos.org>.

[63] Stadtkulturdirektion Weimar (Hrsg.), *Frisst der Kapitalismus seine Kinder? Weimarer Reden* 2010. ISBN-13: 978-3-941830-06-6.

[64] Stiftung Karlheinz Böhm,
<http://www.MenschenFuerMenschen.de>